

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

**MONIKA JAKOVLJEVIĆ**

***INTERAKTIVNA ANALIZA KOMBINIRANOG NAČINA TEMELJENJA***

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

***INTERAKTIVNA ANALIZA KOMBINIRANOG NAČINA TEMELJENJA***

KANDIDAT:

Monika Jakovljević

MENTOR:

Izv. prof. dr. sc. Krešo Ivandić

VARAŽDIN, 2017.

## SAŽETAK

Autor: Monika Jakovljević

Naslov rada: Interaktivna analiza kombiniranog načina temeljenja

Ključne riječi: Temelji, plitki temelji, duboki temelji, piloti, diferencijalna jednadžba problema i rubni uvjeti, kombinirani način temeljenja, proračun krutosti, određivanje pomaka.

**Sažetak:** U ovom diplomskom radu predstavljeni su općenito temelji, njihova podjela na plitke i duboke temelje, zatim zasebna cjelina o pilotima. Posebno je opisan kombinirani način temeljenja te njihov proračun krutosti pilota i roštilja, i određivanje pomaka.

Temelj je dio građevine kojim se opterećenja iz kontroliranog nadzemnog dijela prenose u prirodnu sredinu, tlo, na način da građevina bude upotrebljiva i stabilna. Temelj je sastavni dio svake građevine, a oblik temelja i dubina temeljenja ovise o vrsti građevine i osobinama tla ispod nje. Temelji nikad nisu sami sebi svrha, oni su prijelazni dijelovi u kojima se preraspodjeljuju unutrašnje sile iz vitkih i tankih elemenata konstrukcije u masivne i široke temelje. Granica između plitkih i dubokih temelja nije strogo određena, ali se kao gruba podjela može prihvatiti ona po kojoj je dubina ukopavanja temelja u temeljno tlo manja od širine temelja.

U slučaju kada dio objekta leži na čvrstom tlu, a dio na mekom tlu ili nasipu, tada se objekt treba jednim dijelom plitko temeljiti, a drugim dijelom duboko temeljiti. Takav način temeljenja se naziva kombinirani način temeljenja. Dio objekta na slabom tlu se duboko temelji na pilotima različite duljine, dok se dio objekta plitko temelji na temeljnom roštilju.

Ovakav objekt se nema potrebe temeljiti kompletno na pilotima jer bi onda došlo do nepotrebnog bušenja stijene već s površine terena, što bi dodatno izazvalo troškove i gubljenje vremena, niti ima potrebe temeljiti cijeli objekt plitko zbog slabog sloja tla od površine terena do stijene. Takav kombinirani način temeljenja se koristi isključivo na mjestima neujednačenog sastava tla, jer je isplativije i efikasnije.

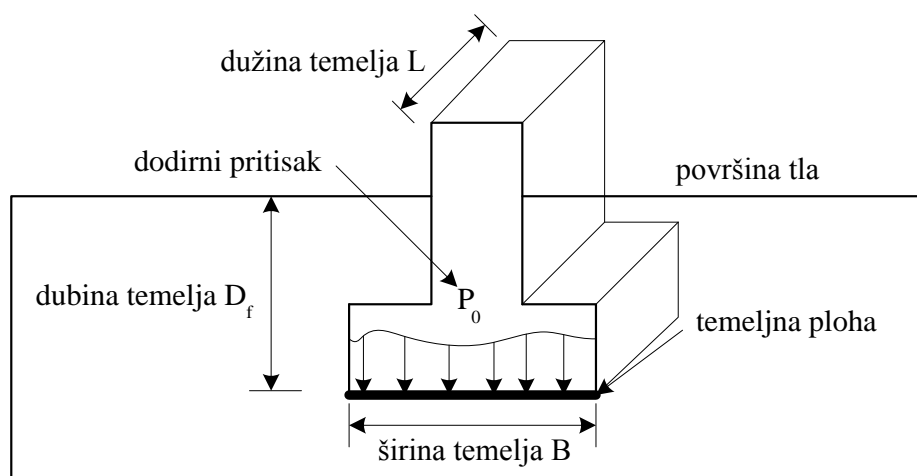
## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. PLITKO TEMELJENJE .....	3
2.1. PODJELA PLITKIH TEMELJA.....	5
3. DUBOKO TEMELJENJE.....	7
3.1. PODJELA DUBOKIH TEMELJA.....	8
4. ODABIR NAČINA I DUBINE TEMELJENJA .....	10
4.1. ODABIR PREMA ZAHTJEVIMA GRAĐEVINE .....	10
4.2. ODABIR PREMA KRITERIJU SLIJEGANJA.....	12
5. PILOTI .....	13
5.1. OPĆENITO .....	13
5.2. OPTEREĆENJE NA PILOTE.....	16
5.3. KLASIFIKACIJA PILOTA .....	17
5.4. DIFERENCIJALNA JEDNADŽBA PROBLEMA I RUBNI UVJETI .....	18
5.5. OPĆENITO O NAČINU PRORAČUNA PILOTA OPTEREĆENIH POPREČNOM SILOM .....	21
5.6. ANALITIČKI NAČIN PRORAČUNA POPREČNO OPTEREĆENIH PILOTA ...	22
5.7. ANALIZA NA JEDNOPARAMETARSKOM MODELU TLA .....	23
5.8. ANALIZA NA DVOPARAMETARSKOM MODELU TLA .....	25
5.9. ODABIR EKVIVALENTNOG KOEFICIJENTA REAKCIJE PODLOGE .....	26
6. KOMBINACIJA DUBOKOG I PLITKOG TEMELJENJA .....	28
6.1. PRORAČUN KRUTOSTI PILOTA .....	30
6.2. PRORAČUN KRUTOSTI TEMELJNOG ROŠTILJA.....	31
7. PRORAČUNSKI DIO.....	32
7.1. ODNOS DULJINE PILOTA U GLINI I HORIZONTALNOG POMAKA PRI OPTEREĆENJU SILOM $H = 100 \text{ kN}$ .....	37
7.2. TEMELJNI ROŠTILJ LEŽI IZRAVNO NA LAPORU .....	49

8.	ZAKLJUČAK .....	58
9.	LITERATURA.....	60

## 1. UVOD

Temelj je dio građevine kojim se opterećenje iz kontroliranog nadzemnog dijela prenose u prirodnu sredinu, tlo, na način da građevina bude upotrebljiva i stabilna. Temelj je sastavni dio svake građevine, a oblik temelja i dubina temeljenja ovise o vrsti građevine i osobinama tla ispod nje. Kako je tlo u pravilu bitno mekši i slabiji materijal od uobičajenih materijala iz kojih je izgrađena konstrukcija, temelji su prijelazni dijelovi u kojima se preraspodjeljuju unutrašnje sile iz vitkih i tankih elemenata konstrukcije u masivne i široke zone tla. Temelj nikad nije sam sebi svrha. Na *Slici 1.* prikazani su osnovni pojmovi vezani uz temelj.



*Slika 1.: Osnovni pojmovi kod temelja*

Izbor načina temeljenja može se prikazati dijagramom toka, kao na *Slici 2.* Način temeljenja ovisan je o nizu čimbenika koje je potrebno utvrditi prije projektiranja temelja. U protivnom temeljenje može biti ograničavajući čimbenik u ostvarivanju projektirane građevine kako tehnički tako pogotovo ekonomski. Iz tog razloga potrebno je vrlo pažljivo pristupiti radnjama opisanim na *Slici 2.*

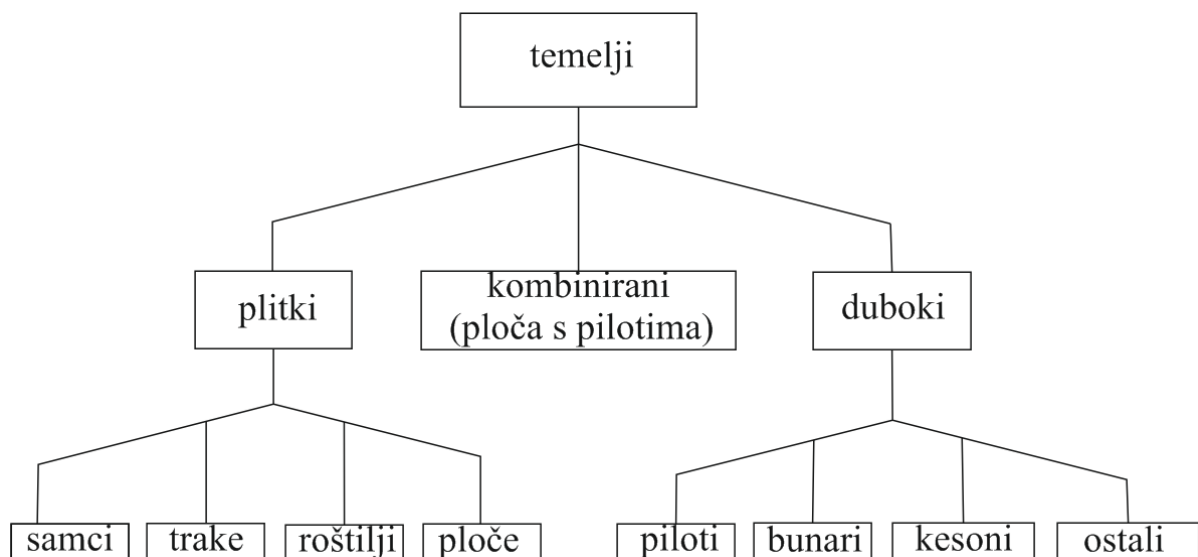


*Slika 2.: Postupak projektiranja temeljenja*

Ukoliko se tlo zadovoljavajućih geotehničkih svojstava nalazi u blizini površine, govori se o plitkom temeljenju. Plitki temelji rasprostiru koncentrirana opterećenja građevina u plitke nosive slojeve tla. Kada se tlo zadovoljavajućih svojstava nalazi dublje ispod površine terena, a građevinu je nužno temeljiti na takvom, boljem tlu, tada se govori o dubokom temeljenju.

Vrste temelja su mnogobrojne i mogu se razvrstati na različite načine od kojih je uobičajen onaj po načinu prijenosa opterećenja u tlo: plitki i duboki temelji te njihova kombinacija (*Slika 3.*). Plitki temelji prenose opterećenja u plitke slojeve tla, dok duboki prenose opterećenje ili u dublje slojeve ili u sve slojeve duž njihove visine. Granica između plitkih i dubokih temelja nije strogo određena, ali se kao gruba podjela može prihvatiti ona po kojoj je dubina ukopavanja temelja u temeljno tlo manja od širine temelja.

Plitko temeljenje podrazumijeva temeljenje na temeljima samcima, trakama, roštiljima, pločama i elastičnim nosačima. Duboki se temelji dijele na pilote, bunare, kesone te neke druge manje zastupljene vrste (*Slika 3.*).



*Slika 3.: Jedna od klasifikacija temelja*

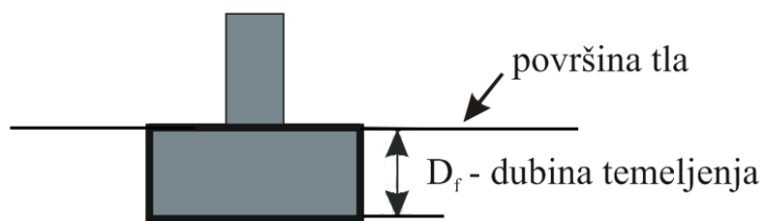
Bez obzira da li se radi o plitkom ili dubokom temeljenju, temelji moraju svojim dimenzijama i dubinskim položajem zadovoljiti dva uvjeta. To su nosivost tla i slijeganje tla. Pri tom je uvijek bitno zadovoljiti slijeganje, jer ukoliko je ono zadovoljeno, nosivost je uglavnom zadovoljena višestruko. Nisu sve građevine jednako osjetljive na slijeganje, ali su sve mnogo osjetljivije na diferencijalna slijeganja nego na ukupna.

## 2. PLITKO TEMELJENJE

Temelji su sastavni dio svake inženjerske konstrukcije, najčešće podzemni elementi, koji imaju ulogu prenositi opterećenje sa konstrukcije na tlo. Plitki temelji opterećenje u tlo prenose dodirnom plohom temelj – tlo, za razliku od dubokih koji prenose opterećenje i trenjem po plaštu. Dubina temeljenja mora zadovoljiti uvjete nosivosti i slijeganja za građevinu kojoj je temelj namijenjen. Pri tome mora biti zadovoljen zahtjev da temelj bude ispod granica smrzavanja za određenu klimatsku zonu.

Svako ono temeljenje koje zadire u dubinu, dovoljno da se zadovolje zadani uvjeti (slijeganje i nosivost), a temeljna stopa se nalazi neposredno ispod najniže kote građevine koju na sebi nosi jeste plitko temeljenje (*Slika 4.*).





*Slika 4.: Plitko temeljenje*

Osnovni smisao plitkog temeljenja je da opterećenje s građevine na tlo prenosi isključivo pritiskom temeljne plohe na tlo. Definicija se temelji na promjeni modela za proračun, a koji koristi teorije razvijene na Prandlovom modelu, Terzaghijevim dopunama s stvarnim tлом i Mayerhofovim prijedlogom modela za plitke temelje i temelje na kosini. Definicija je promjenjiva i kod proračuna temelja nekom od numeričkih metoda.

Prema ovoj definiciji u plitka temeljenja spadaju i temelji svih podzemnih građevina bez obzira na njihovu dubinu ispod površine tla. Pri njihovom proračunu u obzir treba uzeti najmanji nadsloj  $q_0$ , koji pruža kontra teret pasivnom klinu. Po ovoj definiciji u plitka temeljenja spadaju i sva temeljenja na poboljšanom tlu, što ona u stvari i jesu, ali su uvjeti u tlu izmijenjeni.

Pravilnim projektiranjem temelja treba omogućiti predviđene uvjete oslanjanja konstrukcije, prijenos opterećenja u dopuštenim naprezanjima tla, te uz dopuštena slijeganja i njihovu minimalnu neravnomjernost. Dubinu temeljenja u odnosu na površinu terena treba odabirati u skladu sa sastavom i osobinama zemljišta na kojem se konstrukcija temelji, tako da uvjeti odgovaraju zahtjevima sigurnosti protiv sloma u tlu, a slijeganja su u prihvatljivim granicama.

Kriterijem nosivosti je predviđeno da postoji odgovarajuća sigurnost protiv propadanja nosivosti ispod temelja. Kriterijem slijeganja se treba osigurati da slijeganje bude unutar dopuštenih granica. Općenito je kriterij slijeganja više presudan od kriterija nosivosti u projektiranju plitkih temelja, osobito za širine temelja veće od 1.5 metara, što je često slučaj. Ograničavanjem ukupnih slijeganja ograničavaju se diferencijalna slijeganja i bilo kakve kasnije opasnosti.

U pravilu, plitko je temeljenje ekonomičnije od dubokog temeljenja te ga treba primjenjivati uvijek i tamo gdje se odgovarajućim mjerama i postupcima može postići potrebna stabilnost objekta u pogledu nosivosti i slijeganja tla ispod objekta. U današnje vrijeme postoje mnoga

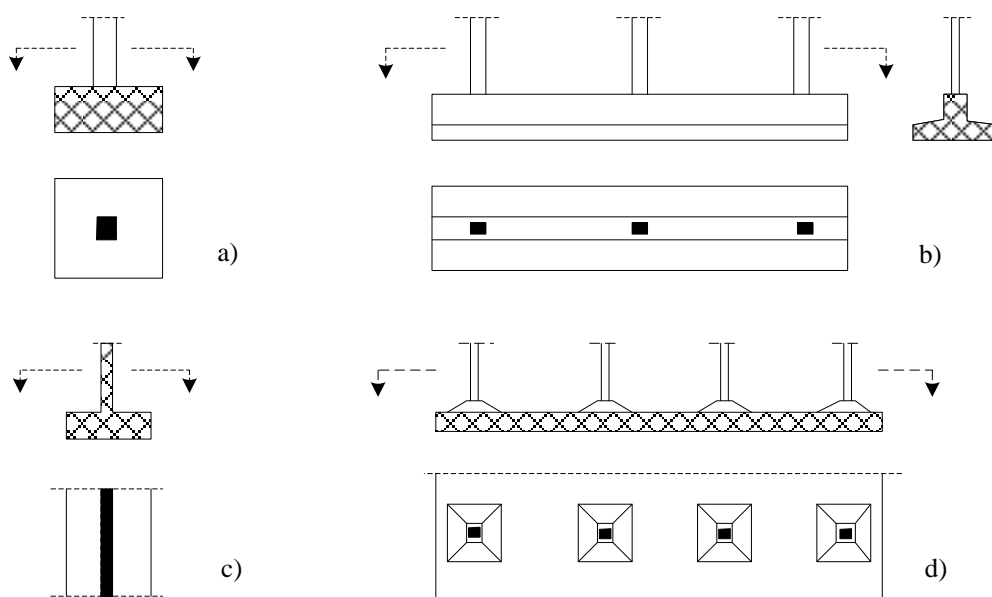
tehnička rješenja za poboljšanje nosivosti, odnosno čvrstoće na smicanje i smanjenje slijeganja tla, tako da se i slabija tla mogu pripremiti za plitko temeljenje.

## 2.1. PODJELA PLITKIH TEMELJA

U plitkom temeljenju, temelji mogu biti klasificirani na:

- Temelji samci – pojedinačni temelji (projektiraju se obično ispod jednog stupa)
- Temeljne trake ( projektiraju se ispod zidova)
- Temeljne grede i temeljni roštilji (projektiraju se ispod niza stupova)
- Temeljne ploče (projektiraju se kod velikog opterećenja i/ili lošeg tla)

Kod plitkog temelja izračunavamo dimenzije naliježuće površine temelja, visinu temelja, odakle se dobije dubina temeljenja, kao i kvaliteta materijala od kojeg je projektiran temelj. To je uglavnom klasa betona nearmiranog betona temelja, ili klasa betona i potrebna armatura armiranog betonskog temelja. *Slika 5.* sa vrstama plitkih temelja.



*Slika 5.: Vrste plitkih temelja: a) temelj samac, b) temeljna greda, c) temeljna traka, d) temeljna ploča*

*Temelji samci* koriste se najčešće kod manjih težina objekta i boljih karakteristika tla ispod stupova okruglog, kvadratnog, pravokutnog ili višekutnog presjeka. Odnos širine i debljine temelja samca je takav da im je progib od savijanja zanemariv u odnosu na slijeganje. Zbog

toga se pretpostavlja da su kruti. Nekad su se gradili od kamena, opeke ili betonskih blokova, a danas se grade od nearmiranog i armiranog betona. Ukoliko je veće opterećenje, a tlo slabijih osobina, potrebno je povećati površinu nalijeganja, što se postiže temeljnim trakama u jednom ili u oba pravca te temeljnim pločama. Temelji samci su najjeftiniji način temeljenja.

*Temeljna greda* se umjesto samaca, može projektirati sa ciljem ujednačavanja potencijalnih neravnomjernih slijeganja, u situacijama kada ili postoji realna opasnost da do novih dođe ili kada je gornja konstrukcija u visokoj mjeri osjetljiva na neravnomjernost premještanja oslonaca.

*Temeljne trake* prenose opterećenja sa zidova ili sustava stupova na tlo. Ekonomičniji i tehnički lakši postupak je izvođenje temeljne trake nego više pojedinačnih temelja, naročito kada su stupovi blizu. Osim temeljnih traka koriste se za veća opterećenja i temeljne trake ojačane nosačima – gredama, sa gornje strane. Oblik temeljnih traka može biti i trapeznog ili drugog oblika, ovisno o konstruktivnim pojedinostima objekta. Obzirom na krutost u ravnini zidova, progib tih temelja u odnosu na njihovo slijeganje je zanemariv kao i kod temelja samaca, pa se također svrstavaju u krute temelje. Grade se na sličan način i od istog materijala kao temelji samci. Uz temelje samce najjeftiniji su način temeljenja.

*Temeljne ploče* su plošne temeljne konstrukcije također spadaju pod savitljive temeljne konstrukcije. Koriste se kad nosivost i krutost tla ne omogućuju izbor temeljnog roštilja, a zbog povećanog utroška materijala od njih su skuplji. U situacijama temeljenja na tlu male ili nedovoljne nosivosti za primjenu nekog od spomenutih vrsta plitkog temeljenja, mogu se projektirati temeljne ploče. Primjena ploča pogodna je u situacijama temeljenja ispod nivoa podzemnih voda, ali i kada je od interesa smanjiti neravnomjernost slijeganja pojedinih dijelova osnove objekta, bilo zbog veće deformacije tla, bilo zbog značajnog utjecaja neravnomjernosti slijeganja na preraspodjelu utjecaja u gornjoj konstrukciji.

Zadaća svakog temelja je da:

- osigura nosivost tla
- osigura snošljiva slijeganja
- osigura funkcionalnost građevine
- spriječi negativne utjecaje na okolne građevine

Temelji općenito moraju biti projektirani i izvedeni tako da osiguraju spomenute uvjete u ukupnom vijeku trajanja građevine, dakle za sve okolnosti koje se u tom periodu mogu pojaviti.

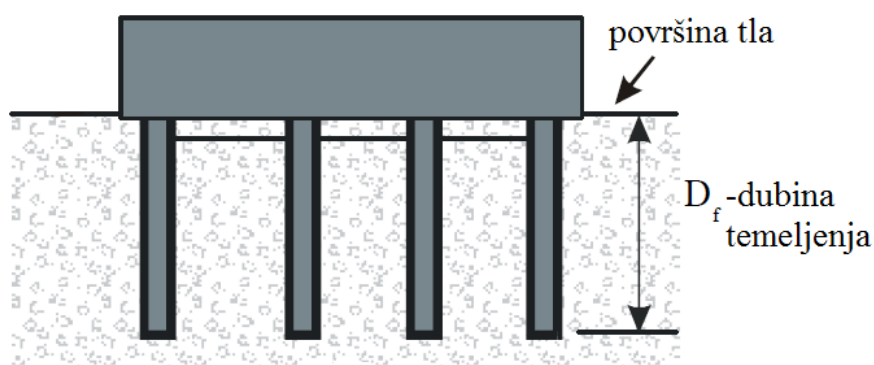
### 3. DUBOKO TEMELJENJE

Duboko temeljenje je svako ono temeljenje pri kojem je dubina temeljena  $D_f > 4B$ , gdje je  $B$  širina temeljne stope, ispod najniže kote građevine koju temelj nosi, a uspravno se opterećenje na tlo, osim preko dodirnog pritiska temeljne plohe, prenosi barem dijelom i trenjem po plaštu tijela ugrađenog u tlo (*Slika 6.*).

Iznimku čine oni piloti, koji opterećenje predaju izravno na čvrstu stijensku podlogu, pa se ne može ostvariti pomak, i neki masivni temelji izvedeni tehnologijom bunara, kod kojih se ne može ostvariti trenje po plaštu.

Duboko temeljenje primjenjuje se kod složenijih građevinskih zahvata, kada temeljno tlo, na dohvatljivoj dubini koja odgovara plitkom ili produbljenom temeljenju, nema svojstva koja mogu zadovoljiti traženu kakvoću s obzirom na slijeganja i /ili nosivost. Duboko temeljenje primijeniti će se i kod temeljenja u dubokoj vodi u kombinaciji sa složenim geotehničkim zahvatima. Upravo je temeljenje u dubokoj vodi uzrokovalo razvoj tehnologija koje danas omogućuju radove svrstane pod naziv duboko temeljenje.

Duboko temeljenje velikim je dijelom izvodljivo zahvaljujući naglom razvoju tehnologije. Duboki temelji se mogu podijeliti na podskupine ovisno o obliku temelja i prijenosu sila u tlo.



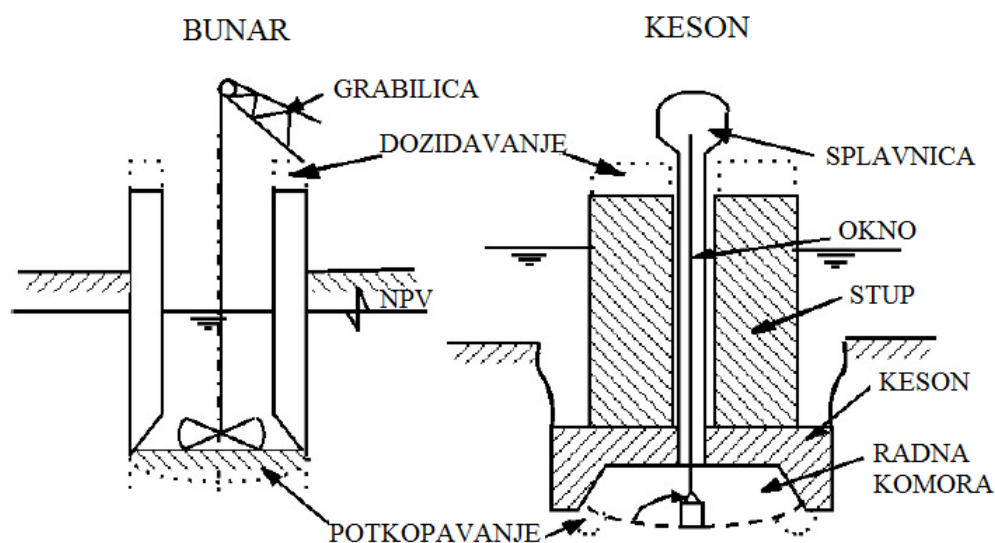
*Slika 6.: Duboko temeljenje*

### 3.1. PODJELA DUBOKIH TEMELJA

Kada se tlo zadovoljavajućih svojstava nalazi dublje ispod površine terena, a građevinu je nužno temeljiti na takvom, boljem tlu, tada se govori o dubokom temeljenju. Duboki temelji mogu se podijeliti u dvije grupe. U prvu spadaju masivni temelji, podijeljeni prema tehnologiji izvođenja na kesone, bunare i sanduke. U drugu grupu spadaju raščlanjeni duboki temelji, (piloti ili šipovi). Bitna razlika u načinu prenošenja sila u tlo kod plitkih i dubokih temelja je u tome što duboki temelji dio tereta prenose u tlo trenjem po bočnim stranicama. Razlika je i u načinu izvođenja, obliku i dimenzijama poprečnog presjeka. Najmanji poprečni presjek imaju piloti, dok su druga tri tipa znatno većih poprečnih presjeka. Izbor vrste dubokog temeljenja ovisi o mnogim čimbenicima.

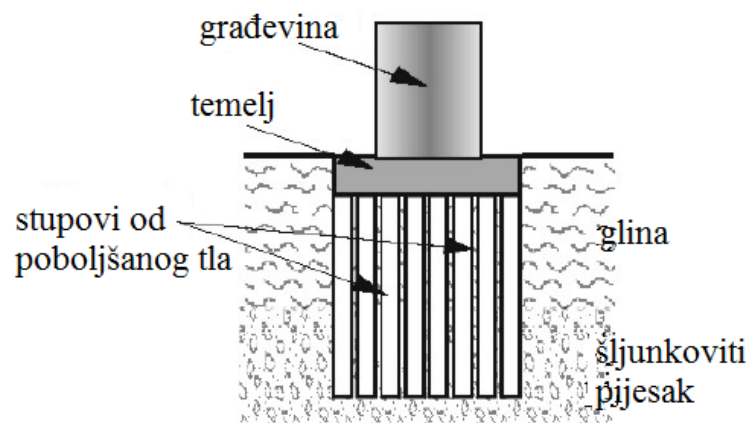
Osnovni oblici dubokih temelja mogu se prikazati kako slijedi:

- a) *duboki masivni*; pojedinačni temelji velikih tlocrtnih dimenzija (kesoni, bunari i sanduci), građevine koje s temeljem čine jedinstvenu cjelinu, kao na primjer priobalne građevine (Slika 7.).



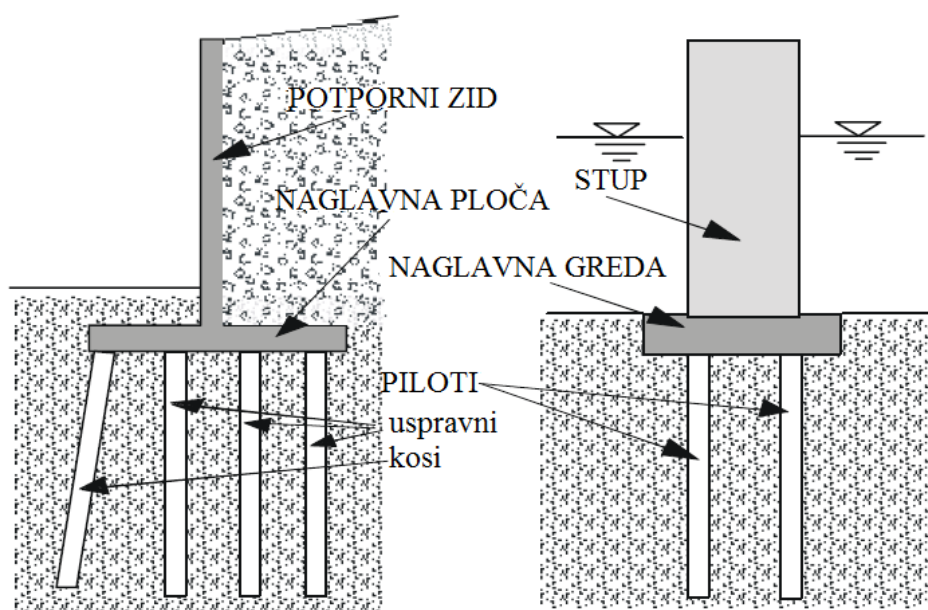
Slika 7.: Duboki masivni temelji izvedeni iskopom (primjer bunara i kesona)

- b) *duboki masivni temelji* – prelazni tip ka pilotima, izvedeni nekom od metoda poboljšanja tla. Metoda omogućava izvedbu ojačanog masivnog bloka ispod površine koju je potrebno temeljiti. Nosivost ovakvog bloka računa se kao nosivost dubokog masivnog temelja koji nosi na trenje po plaštu i na temeljenju plohu. Ako su ojačana tijela dovoljno daleko, pretvaraju se u grupu pilota ili u niz pojedinačnih pilota (Slika 8.).



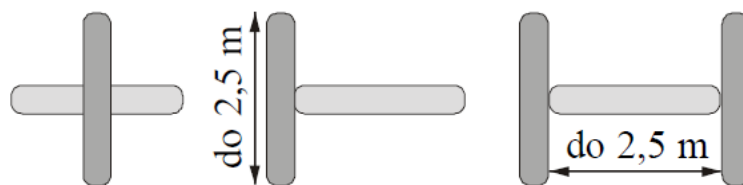
Slika 8.: Duboki masivni temelj od poboljšanog tla (raznih tehnologija izvedbe)

- c) *piloti i/ili raščlanjeni duboki temelji*; koji mogu opterećenje prenositi po principu jedan pilot jedan stup (pilon) ili mogu biti s naglavnom konstrukcijom spojeni u grupe koje prenose opterećenje s građevine preko naglavne konstrukcije na pilote pa u tlo (Slika 9.).



Slika 9.: Duboki, raščlanjeni temelji-piloti (primjer)

- d) *piloti izvedeni od elemenata dijafragmi*; ovisi o tlocrtnom obliku i rasporedu panela da li će se tretirati kao piloti izduženog tlocrta ili kao duboki masivni temelj. Na Slici 10. prikazani su mogući tlocrtni oblici ovakvih dubokih temelja.



*Slika 10.: Tlocrtni oblici dubokih temelja izvedenih od panela tehnologijom dijafragmi i/ili mixed in place (MIP) tehnologijom*

Teško je povući oštru crtu između dubokog temeljenja i poboljšanja temeljnog tla. Tehnologije miješanja tla i veziva, kao i tehnologija mlaznog injektiranja mogu biti duboki temelji ali i vrsta poboljšanja tla. Većina ovih tehnologija omogućava stvaranje uspravnih tijela boljih svojstava od okoline, u tlu. I ovdje ovisi o obliku podzemnog tijela, koji će se računski postupak primijeniti na ovakav tip dubokog temeljenja.

#### **4. ODABIR NAČINA I DUBINE TEMELJENJA**

Najmanja dubina temeljenja određena je propisima. Mora zadovoljiti uvjet da temeljna ploha bude ispod dubine smrzavanja. Za Hrvatsku je to 0,8 m ispod površine terena. U klimatskim predjelima koji su dugotrajno pod utjecajem vrlo niskih temperatura vrijede sasvim drugi uvjeti za temeljenje.

##### **4.1. ODABIR PREMA ZAHTJEVIMA GRAĐEVINE**

Ovaj odabir prvenstveno se oslanja na potrebe građevine, ne vodi računa o osobinama podtemelnog tla. Odabir je prikazan u *Tablici 1*.

Tablica 1.: Tipične građevine i njeni temelji

GRAĐEVINA	SVRHA	NOSIVI SKLOP	TEMELJ
ZGRADA	Omeđuje i zatvara prostor	Zidovi, stupovi, ploče, grede	Samac, traka, ploča
MOST VIJADUKT	Svladava veće raspone u prostoru	Grede, ploče, okviri, rešetke, lukovi, supovi, piloni, zatege	Samci, ploče, vlačni temelji
POTPORNA GRAĐEVINA	Svladava visinske razlike u terenu	Masivni zid, ploče	Trake, sidra
BRANE	Svladava denivelaciju vode	Masivni zid, ljuska, nasip	Trake, ploče
DIMNJACI, PILONI, STUPOVI, TORNJEVI	Dosizanje velikih visina (antenski, dalekovodni, žičare)	Masivne, vitke konstrukcije, rešetke	Samci, ploče, vlačni temelji
REZERVOARI, SILOSI	Skladištenje rasutih tereta, tekućina i plinova	Kugle, valjci, sačaste čelije	Ploče, trake, roštilji
STAZE DIZALICA	Kretanje na šinama (nema diferencijalnog slijeganja)	Zidovi, grede na više ležajeva na stupovima, kao podloga šinama	Kontinuirani, kruti nosači, nosači na el. podlozi
PODOVI (prostori s teškim vozilima i sl.)	Oslanjanje i prijevoz teških tereta	Ploče	Ploče na elastičnoj podlozi
AERODROMSKE PISTE	Slijetanje i uzlijetanje zrakoplova	Kolnička konstrukcija posebnih zahtjeva	Plošni elastični nosač na el. podlozi
KOLNICI	Podloga za vozila na (gumenim) kotačima	Kolnička konstrukcija	Plošni elastični nosač na el. podlozi
KOLOSJECI	Šinska vozila	Šine na pragovima	Linijski elastični nosač na el. podlozi



Općenito gledajući, pobrojane su građevine po namjeni, a ne po vrsti nosive konstrukcije. Odabir pokazuje da u građevinarstvu i nema toliko velike raznolikosti u vrsti građevine, koliko bi se moglo očekivati. U tablici su nabrojane isključivo vrste plitkog temeljenja, jer je građevina povezana isključivo s potrebnom vrstom temeljenja, ali ne i s potrebnom veličinom nosivosti i slijeganja.

#### 4.2. ODABIR PREMA KRITERIJU SLIJEGANJA

Vrstu temelja potrebno je prilagoditi vrsti tla te vrsti i namjeni građevine. Vrsta i namjena građevine uvjetuju veličinu ukupnih i diferencijalnih slijeganja. Vrste temelja, ovisno o kakvoći temeljnog tla i vrsti nosive konstrukcije, mogu se podijeliti na način prikazan u *Tablici 2.*

*Tablica 2.: Odabir načina temeljenja prema zahtjevima građevine i svojstvima tla*

*a) malo stišljiva tla, male deformacije*

NOSIVA KONSTRUKCIJA	VRSTA TEMELJA
Građevina na stupovima, rešetke i sl.	Temelji samci
Građevine sa zidovima, ljske i sl.	Temeljne trake

*b) jače stišljiva, nehomogena tla, veće deformacije*

NOSIVA KONSTRUKCIJA	VRSTA TEMELJA
Građevina na stupovima, rešetke i sl.	Temeljni nosači
	Temeljni roštilji
Građevine s nosivim zidovima, ljske	Temeljni roštilji
	Temeljne ploče
Zidovi i supovi, ljske, sanduci	Temeljni roštilji
	Temeljne ploče

*c) slabo nosiva i jako stišljiva tla*

NOSIVA KONSTRUKCIJA	VRSTA TEMELJA
Sve vrste građevina osim nasipa	Duboko temeljenje
Sve vrste građevina i nasipa	Hibridno temeljenje
	Temeljenje na poboljšanom tlu

*d) temeljenje na tlu različitih osobina*

NOSIVA KONSTRUKCIJA	VRSTA TEMELJA
Sve vrste građevina osim nasipa	Podtemeljne građevine

## 5. PILOTI

### 5.1. OPĆENITO

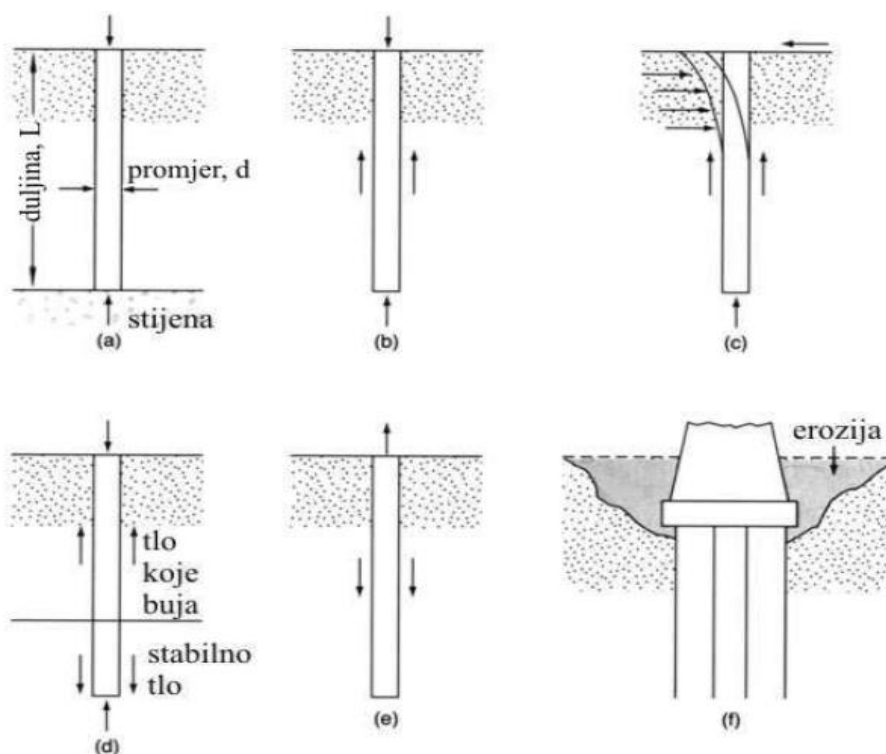
Kada tlo u dostupnoj dubini nema dovoljnu moć nošenja ili je pak njegova stišljivost prevelika, pa bi slijeganje bilo neprihvatljivo veliko, građevina se mora osloniti na dublje slojeve tla koji imaju veću nosivost ili manju stišljivost. U takvim slučajevima riječ je o dubokom temeljenju građevine, među koje spada i temeljenje na pilotima. Piloti su stupovi od čvrstog materijala koji, uz zahtjevani stupanj sigurnosti, prenose sile od građevine na dublje slojeve tla. Pilot je dominantno jednodimenzionalni (štapni) element, dok materijali od kojih se rade piloti mogu biti različiti (drveni, armiranobetonski, metalni, šljunčani, vapneni, zemljano-cementni, glineno-betonski). Bez obzira na materijal od kojeg je izrađen, pilot je element u sistemu konstrukcija-tlo čija je krutost puno veća od krutosti tla u kojem se pilot nalazi i čije se ponašanje može relativno dobro predvidjeti uobičajenim pojednostavljenjima (linearno elastični materijal), barem za uobičajeni raspon radnih sila.

Piloti su najstarija vrsta dubokog temeljenja. Mogu djelovati kao pojedinačni temelji ili u grupi. Mogu, ali i ne moraju biti spojeni naglavnicom. Češća je njihova primjena u grupi. Piloti mogu u tlo prenositi i vlačnu silu, koja se javlja u slučaju kada piloti djeluju kao par kod prijenosa

momenata u tlo. Piloti se mogu izvoditi i kao kosi. Naglavnica prenosi i preraspodjeljuje opterećenja od građevine na pilote.

S druge strane, tlo ima sasvim drugačije osobine od pilota. Geometrijske i mehaničke karakteristike tla se ne mogu unaprijed propisati, već ih treba utvrditi na svakoj lokaciji, gdje se želi graditi. Općenito karakteristike tla su nelinearno i neelastično ponašanje uz svojstva nehomogenosti i anizotropnosti. Isto tako realno tlo pokazuje svojstva povezanog kontinuuma tj. djelovanjem opterećenja u jednoj točki neće doći do deformacija i pomaka samo u toj točki, već i u onim točkama koje nisu direktno opterećene. Iz tih razloga problem zajedničkog rada dva tako različita elementa postaje vrlo složen. Općenito statička analiza pilota u tlu spada u kategoriju problema interakcije objekt-tlo. Reaktivni pritisci tla ovisni su o pomaku pilota, ali s druge strane veličina pomaka pilota ovisi o otporu tla. Osnovna razlika u do sada razvijenim postupcima za proračun pilota u tlu je u načinu modeliranja tla. U prvoj grupi modela tlo se analizira kao sustav nezavisnih opruga ili pak povezanih opruga preko tzv. membranske sile. Druga grupa modeliranja tla prezentirana je modelom tla kao elastičnog kontinuuma, gdje se proračuni provode numeričkim metodama (metoda konačnih elemenata, metoda konačnih diferencija, metoda rubnih elemenata), jer nije moguće dobiti rješenja u zatvorenom obliku.

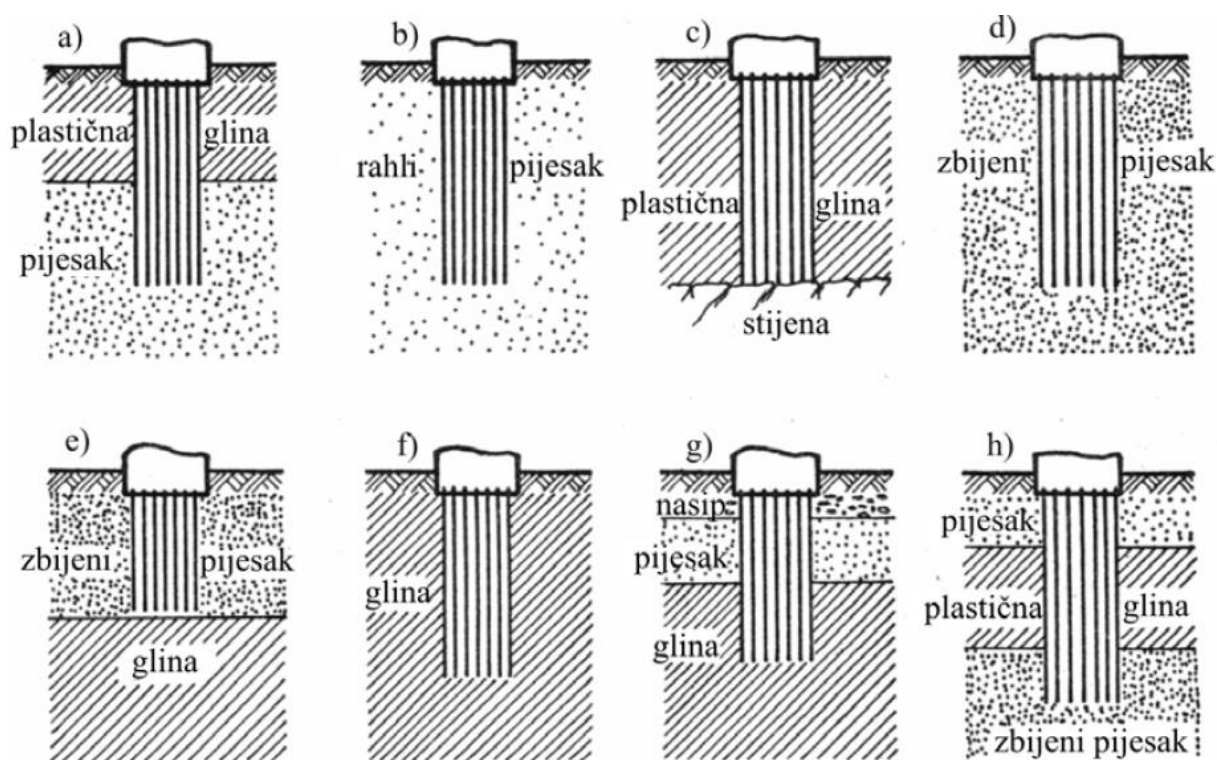
Prema Das, (2000.) piloti se koriste u uvjetima i na način prikazan na *Slici 11*.



*Slika 11.: Uvjeti korištenja pilota i osnovne oznake*

Na *Slici 11. (a)* je pilot koji opterećenje prenosi kroz loše tlo u čvrstu stijensku podlogu, na vrh, bez sudjelovanja trenja po plaštu. Na *Slici 11. (b)* pilot prenosi opterećenje dijelom na vrh, a dijelom trenjem po plaštu u homogenom tlu. Pilot na *Slici 11. (c)* prenosi u tlo vodoravna opterećenja nastala djelovanjem momenata i vodoravne sile iz nadzemnog dijela građevine, uslijed djelovanja vjetrova, potresa ili nekih drugih opterećenja. Na *Slici 11. (d)* pilot prolazi kroz tlo koje reagira na promjenu vlage, buja ili se radi o tlu koje može kolabirati kao na pr. les. Tada je temeljenje na pilotima jedino moguće rješenje, ako se dobro nosivo tlo nalazi na razumno dohvatljivoj dubini. Na *Slici 11. (e)* prikazan je pilot koji je opterećen vlačnom silom. Ovakvi se piloti mogu pojaviti kod dalekovodnih stupova, platformi za vađenje nafte, i građevina pod značajnim utjecajem uzgona. Na *Slici 11. (f)* prikazana je primjena temeljenja na pilotima stupa mosta, kod kojeg postoji mogućnost pojave erozije riječnog korita oko stupnog mjesta.

Na *Slici 12.* prikazan je niz slučajeva primjene temeljenja na pilotima uz raspravu o opravdanosti odnosno neopravdanosti primjene takvog načina temeljenja.



*Slika 12.: Odnosi pilota i tla, prikladni i neprikladni za primjenu pilota*

Za preporučiti je primjenu pilota u slučajevima sa *Slike 12. a)* i *c)*. Za slučaj *12. b)* postoje mogućnosti poboljšanja temeljnog tla pa piloti nisu uvijek optimalno rješenje. U slučajevima

sa *Slike 12. d) i e)* nema potrebe za temeljenjem na pilotima osim ako se ne radi, kao i na *Slici 12. f)*, o mogućoj pojavi erozije ispod temelja. U ostalim slučajevima potrebno je razmotriti opravdanost izvedbe pilota ovisno o kakvoći glina i stvarnom stanju na terenu.

## 5.2. OPTEREĆENJE NA PILOTE

Piloti su u najvećem broju slučajeva opterećeni silom i/ili koncentriranim momentom na svojem vrhu. Kosa sila rastavlja se na komponentu u smjeru osi pilota i okomito na njegovu os.

Za analizu uzdužno opterećenih pilota nosivost tla imati će ključnu ulogu pri dimenzioniranju, dok će kod poprečno opterećenih pilota to najčešće imati maksimalni moment savijanja u pilotu ili maksimalni (horizontalni) pomak vrha pilota.

Kod uzdužno opterećenih pilota u većini je slučajeva tlo kritični element, jer uzdužne sile koje djeluju na pilot nisu dovoljno velike da značajnije deformiraju pilot (skraćenje ili produljenje), prije nego li dođe do loma tla.

Kod poprečno opterećenih pilota, opterećenja na pilot su dovoljno velika da se mora izvršiti analiza naprezanja i deformacija u pilotu, jer pilot postaje kritičan element u sistemu konstrukcija-tlo.

Najstariji način opisivanja ponašanja tla je modeliranje tla nezavisnim oprugama konstantne krutosti ili tzv. Winkler-ov model. Ovaj model je do sada najprimjenjivaniji u praksi zbog svoje jednostavnosti, te velikog iskustva u primjeni modela na različitim inženjerskim problemima.

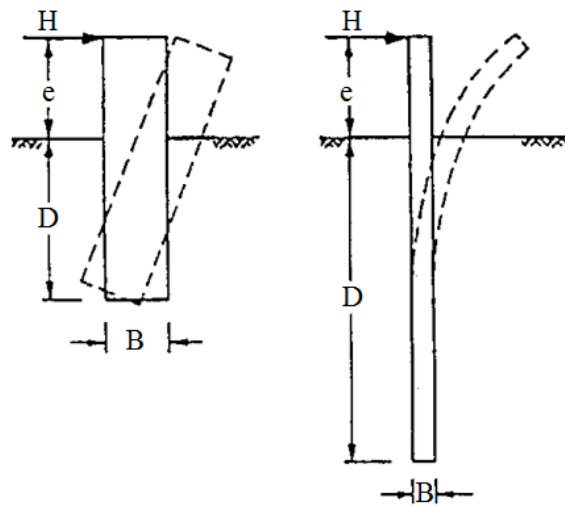
Drugi način modeliranja tla u proračunima poprečno opterećenih pilota je model tla kao elastičnog kontinuuma. Rješenja takvog tipa bazirana su na Mindlin-ovom rješenju djelovanja koncentrirane sile u elastičnom poluprostoru.

Zadnji način modeliranja tla je analiza metodom konačnih elemenata, gdje se diskretizacijom pilota omogućuje točnije modeliranje problema interakcije pilota i tla.

### 5.3. KLASIFIKACIJA PILOTA

Kada pilot može izdržati razinu deformacije koja dovodi do sloma tla nazivamo ga krutim, dok u situaciji kada pilot postaje kritičan i do njegova sloma dolazi pri deformaciji ispod kritične razine za tlo nazivamo ga fleksibilnim ili elastičnim pilotom (*Slika 13.*). Može se reći da su kruti piloti kratki, dok su dugi fleksibilni, međutim za točnu klasifikaciju potrebno je uzeti u obzir i odnos krutosti pilota i tla te dužinu pilota.

Za definiranje krutih ili fleksibilnih pilota koristi se pojam tzv. kritične dužine pilota. To je dužina pilota nakon koje promatrane veličine (pomaci, momenti, reaktivni pritisci) poprimaju beznačajne vrijednosti.



*Slika 13.: Kruti i fleksibilni pilot opterećen horizontalnom silom H*

Prema Fleming, Weltman, Randolph, Elson (1980) za pilot dane fleksione krutosti  $E \cdot I_p$ , koji se nalazi u tlu, koje je karakterizirano koeficijentom reakcije tla  $k$ , kritična dužina pilota definira se kao:

$$l_k = 4 \cdot \left[ \frac{(E \cdot I)_p}{k \cdot d} \right]^{\frac{1}{4}} \quad [m]$$

gdje su:

- $EI_p$  - krutost pilota na savijanje [ $\text{kNm}^2$ ],
- $k$  - koeficijent reakcije tla  $k$  (Winkler-ov koeficijent) [ $\text{kN/m}^3$ ],
- $d$  - promjer pilota [m],
- $l_k$  - kritična dužina pilota [m].

Vidi se da kritična dužina  $l_k$  uključuje oba elementa tj. pilot i tlo, preko računskog koeficijenta reakcije tla  $k$ , promjera pilota  $d$  i krutosti pilota  $E \cdot I$ . Ako je pilot, u računskom smislu greda, veoma krut u odnosu na tlo,  $l_k$  poprima relativno veliku vrijednost, što će imati za posljedicu da će opterećenje na pilot uzrokovati pomake pilota na značajnijoj udaljenosti od mjesta djelovanja opterećenja. S druge strane mekani pilot i kruto tlo dati će relativno malu kritičnu dužinu. Tako se može za određeni pilot i tlo u kojem se pilot nalazi, odrediti kritična dužinu tog sistema i iz rješenja zadanog problema odrediti točku u kojoj će pomak biti jednak nuli, te nakon koje pomaci padaju na zanemarive vrijednosti. Ako je pilot kraći od kritične dužine nazivamo ga kruti pilot, dok je pilot duži od efektivne dužine fleksibilni pilot. Drugim riječima, što je veći odnos krutosti pilota i tla, to je potrebna veća dužina pilota da ga se može smatrati fleksibilnim.

U slučaju da dno pilota trpi neke pomake i deformacije, a istovremeno dolazi do savijanja pilota uslijed poprečnog opterećenja, takav pilot računamo kao fleksibilni pilot konačne dužine, dok za slučaj kada su pomaci na dnu pilota zanemarivo mali, pilot možemo računati kao da je beskonačno dug. Ovaj drugi slučaj ima utjecaja na pojednostavljenje općeg rješenja diferencijalne jednadžbe prilikom analitičkog rješavanja problema.

Kratki piloti računaju se na bazi teorije plastičnosti, gdje je težište bačeno na određivanje nosivosti tla u sistemu pilot - tlo. Mjerodavna veličina za dimenzioniranje je maksimalno horizontalno opterećenje pilota obzirom na nosivost tla.

Kod elastičnih pilota dominantne su deformacije linije pilota te maksimalne rezne sile u pilotu, koje su mjerodavne za dimenzioniranje.

#### 5.4. DIFERENCIJALNA JEDNADŽBA PROBLEMA I RUBNI UVJETI

Opća diferencijalna jednadžba problema poprečno opterećenog pilota glasi:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y(z)}{dz^4} = -q(z) + f(z)$$

gdje su:

- $E$  - modul elastičnosti pilota
- $I$  - moment tromosti poprečnog presjeka pilota
- $y(z)$  - nepoznata funkcija horizontalnog pomaka pilota
- $q(z)$  - nepoznata funkcija reaktivnog pritiska tla

- $f(z)$  - poznata funkcija vanjskog opterećenja na pilot

Ovdje se podrazumijeva da ponašanje pilota odgovara ponašanju elastične grede, za koju vrijedi, uz zanemarenje diferencijalnih veličina drugog reda, da je vrijednost četvrte derivacije funkcije pomaka u promatranoj točki nosača jednaka vanjskoj sili u toj točki. U slučaju običnog grednog nosača na točkastim ležajevima (koji su nepokretni ili su im pomaci unaprijed zadani) vanjsko opterećenje je poznato, pa se rješenje može tražiti direktno. Ležajne reakcije traže se iz uvjeta ravnoteže, a funkcija pomaka grednog nosača iz odgovarajućih rubnih uvjeta.

U slučaju pilota ili općenito nosača koji ne leže na točkastim ležajevima već na kontinuiranoj podlozi, osim nepoznate funkcije pomaka pilota pojavljuje se i nepoznata funkcija raspodjele reaktivnih pritisaka u podlozi tj. na nosač.

Da bi problem bio rješiv, potrebno je pronaći dodatnu vezu između dviju nepoznatih funkcija pomaka i reaktivnih pritisaka. Dodatna veza između nepoznatih pomaka i nepoznatih reaktivnih pritisaka u stvari predstavlja određeni model tla. Ako je model jednostavan, kao u slučaju Winkler - ovog modela, problem će se moći riješiti u zatvorenom obliku. U slučaju složenije veze pomaka i reaktivnih pritisaka, te time vjerojatno i realnijeg opisivanja stvarnog ponašanja tla, problem postaje složeniji i više nije moguće dobiti rješenje u zatvorenom obliku, već se problem rješava numerički.

Bez obzira na model tla i način njegova rješavanja, razlikuje se nekoliko karakterističnih slučajeva rubnih uvjeta na vrhu i na dnu pilota.

#### 1. Vrh pilota ( $z = 0$ )

- slobodan pilot

- poznato

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = M_0$$

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dz^3} = T_0$$

- nepoznato

$$y(z=0) = y_0$$

$$\left( \frac{dy}{dz} \right)_{z=0} = \varphi_0$$



- upeti pilot

- poznato

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=0} = 0$$

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dz^3} = T_0$$

- nepoznato

$$y(z=0) = 0$$

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = M_0$$

## 2. Dno pilota ( $z = l$ )

- slobodan pilot

- poznato

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = M_l = 0$$

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dz^3} = T_l = 0$$

- nepoznato

$$y(z=l) = y_l$$

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=l} = \varphi_l$$

- upeti pilot

- poznato

$$y(z=l) = 0$$

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=l} = 0$$

- nepoznato

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} = M_l$$

$$-E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dz^3} = T_l$$

## 5.5. OPĆENITO O NAČINU PRORAČUNA PILOTA OPTEREĆENIH POPREČNOM SILOM

Način proračuna poprečno opterećenih pilota ovisi o složenosti modela tj. o tome u kojoj mjeri ćemo se računskim modelom približiti stvarnom ponašanju tla. Način proračuna se može podijeliti na analitički i numerički.

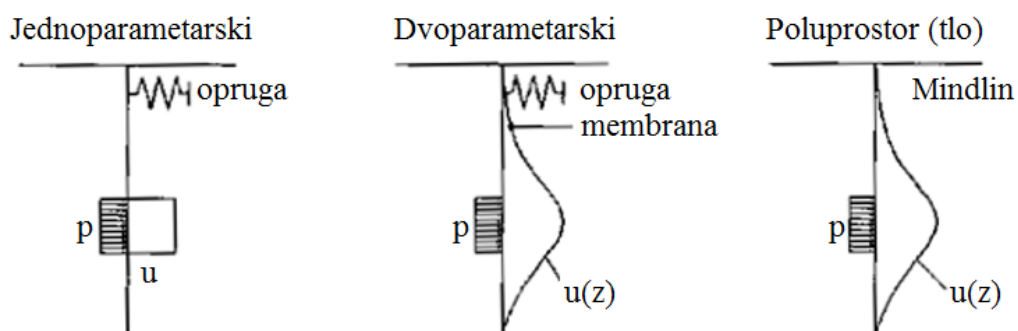
Analitički način proračuna primjenjiv je samo na jednostavnim modelima, kao što je Winkler-ov jednoparametarski model s konstantnim koeficijentom reakcije tla po dubini. Isto tako moguće je dobiti rješenje u zatvorenom obliku i za tzv. dvoparametarski model tla, koji osim krutosti opruge, sadrži i dodatni parametar kojim se pokušava opisati svojstvo tlo kao povezanog kontinuuma. I u ovom slučaju koeficijent krutosti tla  $k$  konstantan je po dubini. Osim za konstantan koeficijent reakcije tla moguće je dobiti analitičko rješenje za linearno rastući koeficijent reakcije i to korištenjem redova potencija.

Analitičkim putem se jedino nehomogenost tla preko linearne varijacije koeficijenta te kontinuiranost, preko dodatnog parametra u dvoparametarskom modelu, može djelomično uzeti u obzir.

U slučaju kada se modelom želimo približiti stvarnom ponašanju tla, složenost proračuna raste, te se moramo koristiti numeričkim metodama. U skupinu modela čija se rješenja ne mogu dobiti u zatvorenom obliku spadaju Mindlin - ov model poluprostora, nelinearni model poluprostora, ali isto tako i nelinearni jednoparametarski i dvoparametarski modeli sa složenijom raspodjelom koeficijenta reakcije tla po dubini.

Najprimjenjivnije numeričke metode proračuna su metoda konačnih diferencija, metoda konačnih elemenata i metoda rubnih elemenata. Osnovna karakteristika tih metoda je diskretizacija (matematička ili fizikalna) problema, koja dovodi do formulacije problema preko niza linearnih algebarskih jednadžbi, čime se problem svodi na rješavanje linearnih sustava jednadžbi umjesto traženja rješenja neprekinutih funkcija.

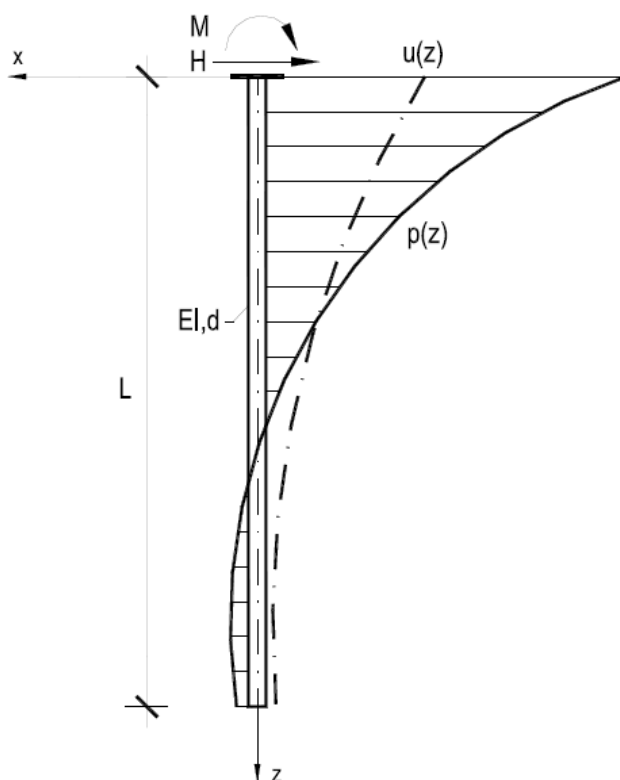
Prikaz dodatnih veza između nepoznatih funkcija pomaka  $u(z)$  i reaktivnih pritisaka tla  $p(z)$  dan je na *Slici 14*.



Slika 14.: Prikaz načina modeliranja tla

## 5.6. ANALITIČKI NAČIN PRORAČUNA POPREČNO OPTEREĆENIH PILOTA

Promatra se horizontalno opterećen pilot koji je opterećen isključivo na vrhu (glavi) pilota, što omogućuje bitno pojednostavljenje problema u tom smislu što se provodi analiza homogenog dijela osnovne diferencijalne jednačbe (Slika 15.). Rubni uvjeti za nalaženje nepoznatih konstanti mogu biti kombinacija upetog i/ili slobodnog pilota na glavi i stopi.



Slika 15.: Horizontalno opterećen vertikalni pilot

Diferencijalna jednačina problema za pilote konstantnog poprečnog presjeka od istog materijala ( $E \cdot I = \text{const}$ ) izgleda ovako:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 u(z)}{dz^4} + p(z) = 0$$

Za ovaj izraz karakteristični su slijedeći rubni uvjeti za slobodni i/ili upeti pilot na vrhu i glavi gdje su:

- $T_0, T_l$  - poprečna sila na vrhu i glavi pilota
- $M_0, M_l$  - moment savijanja na vrhu i glavi pilota
- $u_0, u_l$  - pomak vrha i glave pilota
- $\varphi_0, \varphi_l$  - kut zaokreta vrha i glave pilota

## 5.7. ANALIZA NA JEDNOPARAMETARSKOM MODELU TLA

$$p(z) = k \cdot u(z)$$

$k$  [kN/m<sup>3</sup>] je Winkler - ov koeficijent ili koeficijent reakcije tla. Ovaj koeficijent predstavlja krutost tla ili opterećenje po m<sup>2</sup> površine tla koje daje jedinični pomak. Slijedi diferencijalna jednačina:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 u(z)}{dz^4} + k \cdot u(z) = 0$$

Opće rješenje ove diferencijalne jednačine glasi:

$$u(z) = C_1 \cdot e^{\alpha z} \cdot \cos \alpha z + C_2 \cdot e^{\alpha z} \cdot \sin \alpha z + C_3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos \alpha z + C_4 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \sin \alpha z$$

gdje je:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}}$$

$d$  - promjer pilota

Rješenje predstavlja linearnu superpoziciju umnoška eksponencijalnih i trigonometrijskih funkcija. Vidljivo je da numeričke vrijednosti članova uz nepoznate konstante  $C_1$  i  $C_2$  rastu s dubinom zbog eksponencijalnog dijela izraza. To bi značilo da pomak raste što je veća dubina pilota, što nije fizikalno prihvatljivo za duge pilote (kojima je omjer duljine i promjera veći od deset puta). Zbog toga se zanemaruje dio općeg rješenja uz  $C_1$  i  $C_2$  te se pilot tretira kao polubeskonačan sa dva rubna uvjeta samo na glavi pilota te se može pisati:

$$u(z) = C_1 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos \alpha z + C_2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \sin \alpha z$$

Pripadne derivacije ovog općeg rješenja dane su slijedećim izrazima:

$$u'(z) = -C_1 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) + C_2 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z)$$

$$u''(z) = 2 \cdot C_1 \cdot \alpha^2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \sin \alpha z - 2 \cdot C_2 \cdot \alpha^2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos \alpha z$$

$$u'''(z) = 2 \cdot C_1 \cdot \alpha^3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z) + 2 \cdot C_2 \cdot \alpha^3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z)$$

Funkcija momenata savijanja:

$$M(z) = -E \cdot I \cdot u''(z) = 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot (C_2 \cdot \cos \alpha z - C_1 \cdot \sin \alpha z)$$

Funkcija poprečnih sila duž nosača:

$$T(z) = -E \cdot I \cdot u'''(z) = 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot [(C_1 - C_2) \cdot \sin \alpha z - (C_1 + C_2) \cdot \cos \alpha z]$$

U slučaju beskonačno dugog pilota provodi se analiza dvije kombinacije rubnih uvjeta na glavi pilota (na stopi su za duge pilote pomak i kut zaokreta jednaki nuli zbog velike vrijednosti argumenta  $z$ ):

Slobodan pilot:

$$M(0) = M_0 \quad \Rightarrow \quad 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^2 \cdot C_2 = M_0$$

$$T(0) = H_0 \quad \Rightarrow \quad 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^3 \cdot (C_1 + C_2) = -H_0$$

Rješenje sustava:

$$C_1 = -\frac{H_0 + \alpha \cdot M_0}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I}$$

$$C_2 = \frac{\alpha \cdot M_0}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I}$$

Konačno redom funkcije pomaka, kuta zaokreta, momenta i poprečnih sila:

$$u(z) = -\frac{e^{-\alpha z}}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I} \cdot [(H_0 + \alpha \cdot M_0) \cdot \cos \alpha z - \alpha \cdot M_0 \cdot \sin \alpha z]$$

$$u'(z) = -\frac{(H_0 + \alpha \cdot M_0)}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) + \frac{\alpha \cdot M_0}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z)$$

$$M(z) = e^{-\alpha z} \cdot \left[ \left( \frac{H_0}{\alpha} + M_0 \right) \cdot \sin \alpha z + M_0 \cdot \cos \alpha z \right]$$

$$T(z) = \alpha e^{-\alpha z} \cdot \left[ \left( \frac{H_0}{\alpha} + M_0 \right) \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z) - M_0 \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) \right]$$

Vidljivo je da jednoparametarski model ne opisuje svojstvo tla kao kontinuuma, jer pomak tla u takvom modelu nastaje samo u točkama gdje djeluje opterećenje. Susjedne točke koje nisu direktno opterećene nepomične su, što je u suprotnosti s realnim ponašanjem tla. Isto tako Winkler - ov koeficijent reakcije tla u stvarnosti nije konstantan, već ovisi o opterećenju i veličini opterećene površine te vrijedi samo za određeno stanje naprezanja u tlu. Za isti iznos opterećenja, na istom tlu za dvije različite veličine opterećene površine dobivaju se različite vrijednosti koeficijenta reakcije tla u istoj promatranoj točki.

## 5.8. ANALIZA NA DVOPARAMETARSKOM MODELU TLA

$$p(z) = k \cdot u(z) - N \cdot \frac{d^2 u}{dz^2}$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe može se napisati u sljedećem obliku:

$$u(z) = e^{\alpha z} \cdot (C_1 \cdot \cos \beta z + C_2 \cdot \sin \beta z) + e^{-\alpha z} \cdot (C_3 \cdot \cos \beta z + C_4 \cdot \sin \beta z)$$

gdje je:

- $\alpha = \sqrt{\lambda^2 + \frac{N}{4 \cdot E \cdot I}}$
- $\beta = \sqrt{\lambda^2 - \frac{N}{4 \cdot E \cdot I}}$
- $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}} \quad [1/m]$
- $k, d, E, I, C_i$  - kao i kod jednoparametarskog modela

Može se računati s beskonačno dugim pilotom, kao i kod jednoparametarskog modela, kada je dužina pilota veća od kritične, pa je opće rješenje:

$$u(z) = e^{-\alpha z} \cdot (C_3 \cdot \cos \beta z + C_4 \cdot \sin \beta z)$$

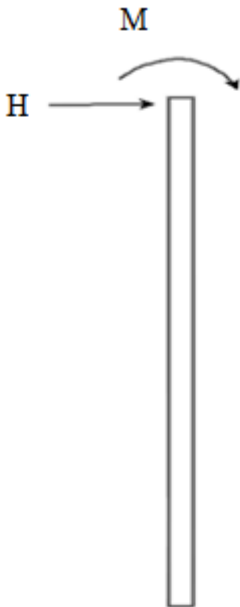


Nepoznate konstante  $C_3$  i  $C_4$  određuju se iz rubnih uvjeta na vrhu pilota.


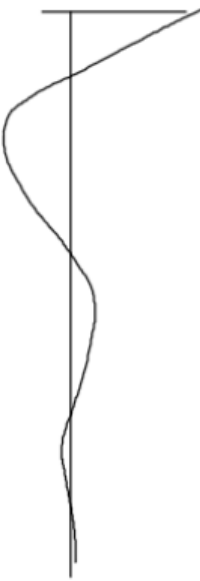

Dvoparametarski model, koji je nastao kasnije od jednoparametarskog modela i koji je imao za cilj poboljšanje jednoparametarskog modela tla, opisuje svojstvo tla kao kontinuiranog medija preko krutosti membrane. Međutim kao i kod jednoparametarskog modela tla, pojavljuje se problem određivanja parametara modela  $k$  i  $N$ . Ovi parametri nisu fizikalni parametri te ih je problem odrediti u konkretnom inženjerskom problemu.

## 5.9. ODABIR EKVIVALENTNOG KOEFICIJENTA REAKCIJE PODLOGE

Konkretna odabir vrijednosti  $k$  ovisi o nizu faktora:

- ispitivanju pilota na terenu
- modelskom ispitivanju pilota
- načinu izvedbe pilota
- rezultatima laboratorijskih i *in situ* ispitivanja svojstava tla
- postojećem iskustvu na predmetnoj lokaciji
- fazi projektiranja
- uračunatom riziku
- iskustvu projektanta

H, M	y	$S = \frac{dy}{dx}$
		
	Pomak	Rotacija

$M = E \cdot I \cdot \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)$	$V = E \cdot I \cdot \left( \frac{d^3 y}{dx^3} \right)$	$p = E \cdot I \cdot \left( \frac{d^4 y}{dx^4} \right)$
		
Moment	Posmik	Reakcija tla
Slika 16.: Funkcije naprezanja pilota i tla		



$$k_{hi} = \frac{P_i}{w_i} \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$$

## 6. KOMBINACIJA DUBOKOG I PLITKOG TEMELJENJA

Način prijenosa horizontalne sile od potresa na konstrukciju ovisit će o geometriji, te mehaničkim svojstvima konstrukcije i tla. Ovdje se promatra slučaj temeljenja objekta dijelom na pilotima s temeljnom pločom, a dijelom na temeljnom roštilju. U praksi dolazi do slučajeva da se početak stjenovitog tla, ili barem tla puno veće krutosti od površinskog sloja, prostire na različitim dubinama, dok se na dijelu tlocrta objekta može pojaviti praktički na površini terena. U takvim slučajevima moguće rješenje je temeljenje objekta dijelom na pilotima, a dijelom plitko na temeljnom roštilju. Neracionalno bi bilo temeljiti ovakav objekt kompletno na pilotima, jer bi to značilo bušenje tvrde stijene već s površine terena. S druge strane nekorektno je temeljiti cijeli objekt plitko zbog slabih karakteristika sloja tla od površine terena do stijene, naročito u slučaju kada je taj sloj dubok i nepravilne debljine.

Problem određivanja pomaka ovakve konstrukcije, te unutarnjih sila uslijed djelovanja horizontalnih sila od potresa, može biti relativno jednostavno riješen usvajanjem određenih pretpostavki u vezi načina deformiranja sistema. Pretpostavlja se da je naglavna konstrukcija apsolutno kruta, što znači da ona doživljava samo translatorne pomake i rotacije. U prostoru stoga postoji šest stupnjeva slobode takvog sistema. Općenito takva konstrukcija može biti opterećena s četiri generalizirane sile (kosa sila u prostoru i tri momenta savijanja oko triju osi). Kosa se sila može rastaviti na dvije horizontalne i jednu vertikalnu komponentu (okomito i u smjeru osi pilota). U prikazanom primjeru horizontalna sila uslijed potresa djeluje u jednom smjeru u težištu temeljne ploče. Iako opterećenje djeluje simetrično neće doći samo do translatornog pomaka konstrukcije, već nastaje i rotacije ploče uslijed nejednakih uvjeta oslanjanja ploče. Piloti, iako svi jednakih promjera i od istog materijala, imaju različitu duljinu do ulaska u stijenu, te su različitih krutosti na djelovanje horizontalne sile. Pretpostavka o apsolutnoj krutosti naglavne konstrukcije ima za posljedicu to da se pomak naglavne konstrukcije može definirati preko dvije nepoznanice (horizontalni pomak  $u_0$  i kut zaokreta  $\varphi_0$ ). Kada su poznati pomaci naglavne konstrukcije određeni su i svi horizontalni pomaci pilota.

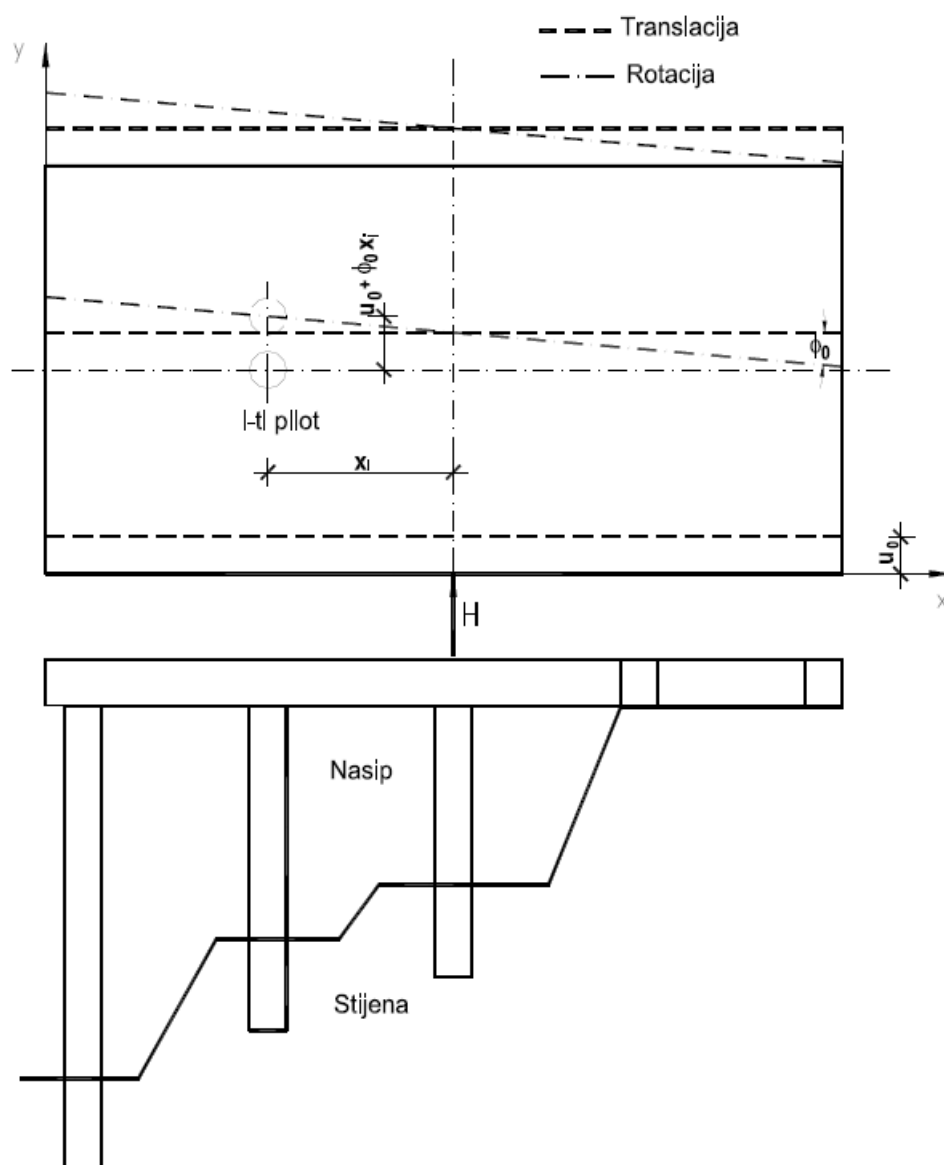
Pretpostavlja se potpuna upetost pilota u naglavnu konstrukciju. Ova je pretpostavka važna, jer definira drugačije rubne uvjete kod proračuna krutosti pilota. Pilot upet u naglavnu konstrukciju

doživljava samo horizontalne pomake, (bez kuta zaokreta) uz aktiviranje momenata upetosti na glavi pilota.

Na kontaktu temeljnog roštilja i stijene (dio objekta koji je temeljen plitko) dolazi do aktiviranja posmičnih naprezanja. Želi li se dobiti točno rješenje potrebno je istražiti zakonitost aktiviranja ovih naprezanja u ovisnosti o pomaku, kako bi se moglo ući u račun pomaka konstrukcije.

Kada su poznate horizontalne krutosti svih pilota i kontakta temeljnog roštilja i tla mogu se postaviti uvjeti ravnoteže za dvije nepoznate veličine pomaka. Na raspolaganju su dva uvjeta ravnoteže i to suma horizontalnih sila, te suma momenata.

Na *Slici 17.* dan je shematizirani prikaz pomaka konstrukcije s tri reda pilota i roštiljnom temeljnom konstrukcijom opterećene horizontalnom silom. Zanimaju se distorzije deformacije, a pomaci pilota nastaju samo u smjeru djelovanja sile, što znači da nema izmicanja pilota uslijed zaokreta naglavne konstrukcije. Ova je pretpostavka realna ukoliko su pomaci pilota relativno mali.



Slika 17.: Plan pomaka apsolutno krute naglavne konstrukcije

### 6.1. PRORAČUN KRUTOSTI PILOTA

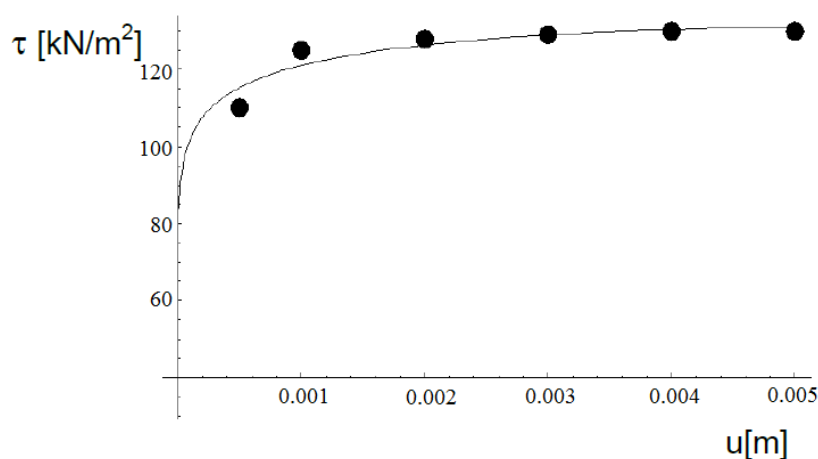
Krutost pilota ovisi o geometriji i mehaničkim svojstvima pilota i tla u kojem se pilot nalazi, ali i o usvojenom računskom modelu proračuna. Ovdje će se prikazati proračun krutosti pilota upetog na vrhu i slobodnog na stopi u tlu koje je modelirano kao elastični poluprostor s konstantnim modulima elastičnosti gornjeg sloja nasipa i stijene. Proračuni su provedeni korištenjem razvijenog programa na Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta, koji omogućuje proračun horizontalno opterećenog pilota s horizontalnom silom i momentom za pilote proizvoljne dužine i proizvoljne uslojenosti tla. Za razvoj programa korišteno je Mindlinovo rješenje za djelovanje horizontalne sile unutar elastičnog poluprostora.

Ako na glavi pilota djeluje neka horizontalna sila  $F_H$  i ako je poznat horizontalni pomak  $u_0$  glave pilota, tada je krutost pilota  $K$  jednaka:

$$K = \frac{F_H}{u_0}$$

## 6.2. PRORAČUN KRUTOSTI TEMELJNOG ROŠTILJA

Vrijednost aktiviranog posmičnog otpora na kontaktu temeljnog roštilja i stijene ovisi o veličini dodirne površine, zatim o koeficijentu trenja na kontaktu roštilja i tla, te o vrijednosti normalnog naprezanja na kontaktu. Rezultati laboratorijskih ispitivanja aktiviranja posmičnog naprezanja na kontaktu betona i stijene, te interpolaciona funkcija za vrijednost normalnog naprezanja od  $\sigma_n = 200 \text{ kN/m}^2$  prikazani su na *Slici 18*.



*Slika 18.: Rezultati laboratorijskih pokusa te interpolaciona funkcija*

Nacrtani parovi dobivenih vrijednosti odnosa pomaka  $u$  [m] i aktiviranog posmičnog naprezanja  $\tau$  [kN/m²] su sljedeći:

(0,0), (0.0005,110), (0.001,125), (0.002, 128), (0.003,129), (0.004,130), (0.005,130), (6,130).

Može se pokazati da sljedeća interpolaciona funkcija dobro aproksimira dobivene vrijednosti (*Slika 18.*):

$$\tau(u) = 1724.91 - 310.955 \cdot e^{-x^{0.1}} - 1413.96 \cdot e^x$$

Očigledno je riječ o nelinearnom odnosu pomaka i posmičnog naprezanja, gdje je potrebno ili odrediti aproksimacionu krivulju ove zakonitosti te provesti račun numerički, nekim od iterativnih postupaka, ili analizu provesti s usvojenim linearnim modulom (sekantnim ili tangentnim), koji neće ovisiti o ostvarenom pomaku.

Primjerice iz dobivenih vrijednosti može se odabrati slijedeća vrijednost sekantnog modula  $K_r$ :

$$K_r = \frac{\tau}{u} = \frac{125}{0.001} \approx 125000 \text{ kN/m}^3$$

Ovu je krutost potrebno množiti s promatranim dijelom kontaktne površine temeljnog roštilja i tla, kako bi se dobila aktivirana sila.

Radi jednostavnosti promatra se težište roštilja, gdje se pretpostavlja da djeluje resultantna sila otpora trenja temeljnog roštilja i stijene.

## 7. PRORAČUNSKI DIO

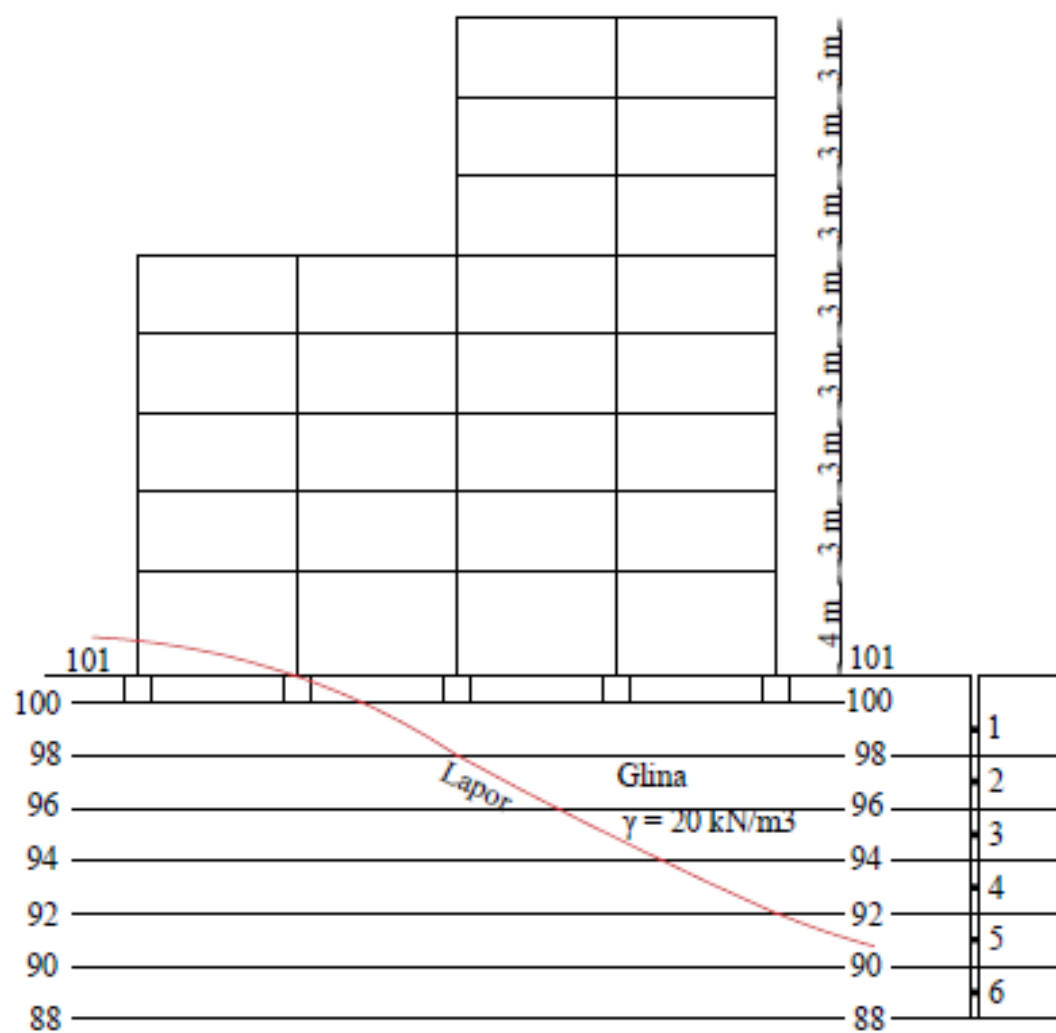
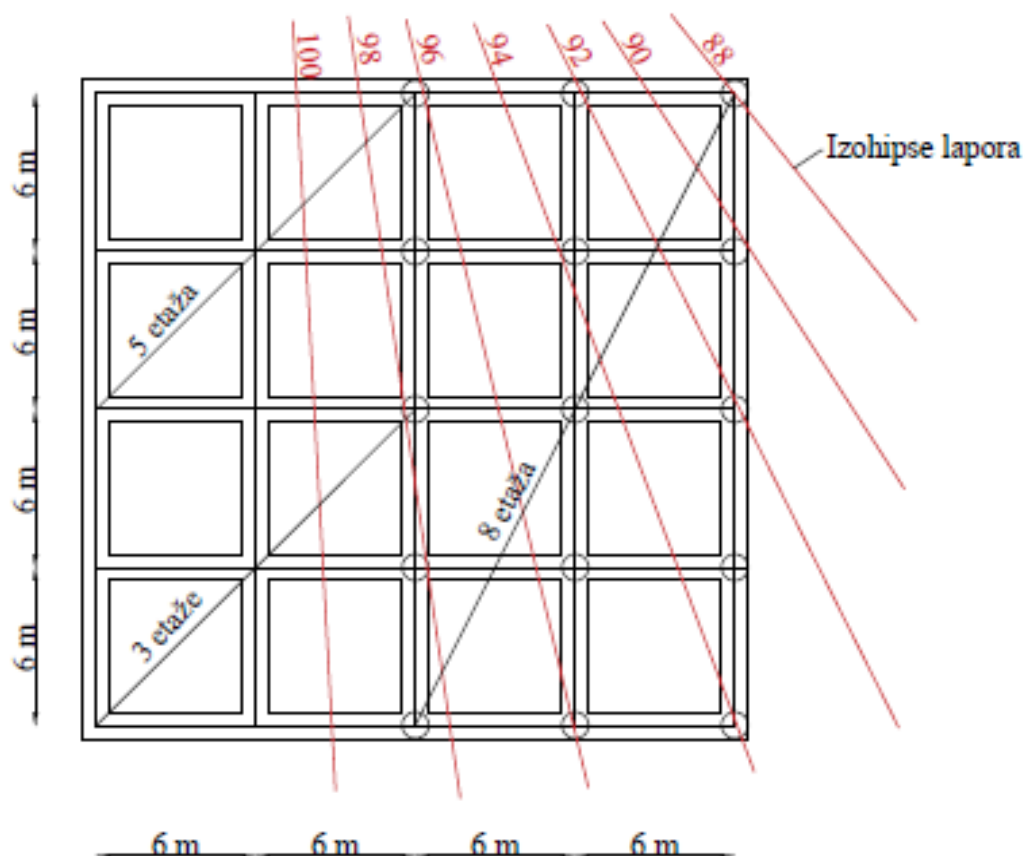
Odrediti vrijednosti horizontalnih pomaka objekta za slijedeće projektne uvjete:

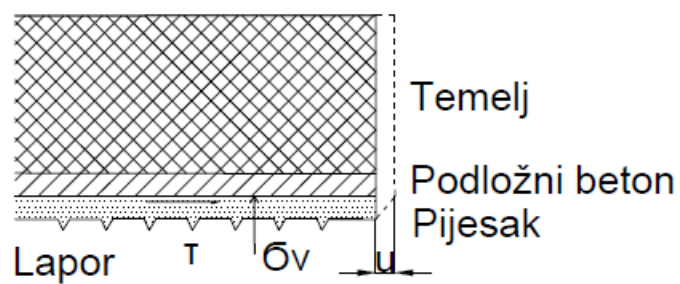
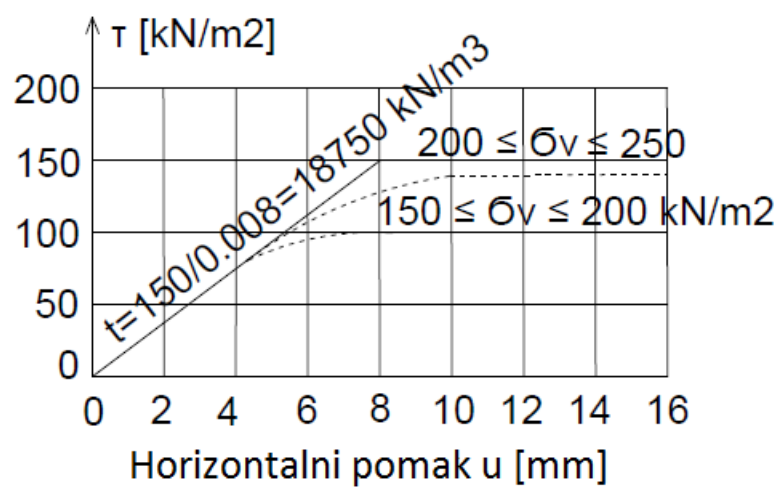
- prosječna težina etaže objekta  $q = 15 \text{ kN/m}^2$
- koeficijent horizontalnog ubrzanja od djelovanja potresa  $k_h = a_h = 0.1 \cdot g$
- parametri deformabilnosti i posmične čvrstoće tla i stijene će biti dani u slijedećoj fazi izrade diplomskog
- piloti promjer  $d = 1.0 \text{ m}$ , potpuno upeti u naglavnu konstrukciju
- duljina pilota određena iz uvjeta ulaska  $3 \text{ m}$  u čvrstu stijenu
- temeljna konstrukcija, zajedno s objektom, je apsolutno kruta - ova pretpostavka omogućava svađanje kinematičke zadaće na određivanje dvije komponente pomaka, translatorsni pomak i rotaciju cijele ploče kao krutog tijela

U radu se osvrnuti općenito na zadaće proračuna poprečno opterećenih pilota u ovisnosti o različitim rubnim uvjetima na glavi i stopi pilota.

## PRILOG

Poprečni presjek temeljnog tla i objekta, te tlocrt temelja.





$i$	$G_i = f_i \cdot 15$	$h_i$	$M_i = G_i \cdot h_i$	$S_i$	$x_i$	$S_i \cdot x_i$
1	$12 \cdot 24 \cdot 7.5 = 2160$	26	56160	$\left(0.15 + 0.85 \cdot \frac{56160}{483840}\right) \cdot 3672 = 913$	18	16434
2	$12 \cdot 24 \cdot 15 = 4320$	23	99360	$0.85 \cdot \frac{99360}{483840} \cdot 3672 = 641$	18	11538
3	4320	20	86400	557	18	10026
4	4320	17	73440	474	18	8532
5	4320	14	60480	390	18	7020
6	4320	11	47520	307	18	5526
7	4320	8	34560	223	18	4014
8	4320	5	21600	139	18	2502
9	4320	1	43200	28	18	504
$G_{1-9} 36720$			483840	3672	18	66096

$$S_{1-9} = a_h \cdot G_{1-9} = 0.10 \cdot 36720 = 3672 \text{ kN}$$

10	$12 \cdot 12 \cdot 7.5 = 1080$	17	18360	$\left(0.15 + 0.85 \cdot \frac{18360}{144720}\right) \cdot 1944 = 501$	6	3006
11	$12 \cdot 12 \cdot 15 = 2160$	14	30240	$0.85 \cdot \frac{30240}{144720} \cdot 1944 = 345$	6	2070
12	2160	11	23760	271	6	1626
13	$12 \cdot 12 \cdot 7.5 = 1080$	11	11880	136	6	816
14	$12 \cdot 24 \cdot 15 = 4320$	8	34560	395	6	2370
15	4320	5	21600	247	6	1482
16	4320	1	4320	49	6	294
19440			144720	1944	6	11664

$$S_{10-16} = a_h \cdot G_{10-16} = 0.10 \cdot 19440 = 1944 \text{ kN}$$

$$\Sigma S_i = 3672 + 1944 = 5616 \text{ kN}$$

$$\Sigma S_i x_i = 66096 + 11664 = 77760 \text{ kNm}$$

$$x_T = \frac{77760}{5616} = 13.85 \text{ m}$$



## POMACI TOČAKA

$$\left. \begin{array}{l} \Delta x = u - y \cdot \varphi \\ \Delta y = v + x \cdot \varphi \end{array} \right\} \text{I. kvadrant}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta x = u - y \cdot \varphi \\ \Delta y = v - x \cdot \varphi \end{array} \right\} \text{II. kvadrant}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta x = u + y \cdot \varphi \\ \Delta y = v - x \cdot \varphi \end{array} \right\} \text{III. kvadrant}$$

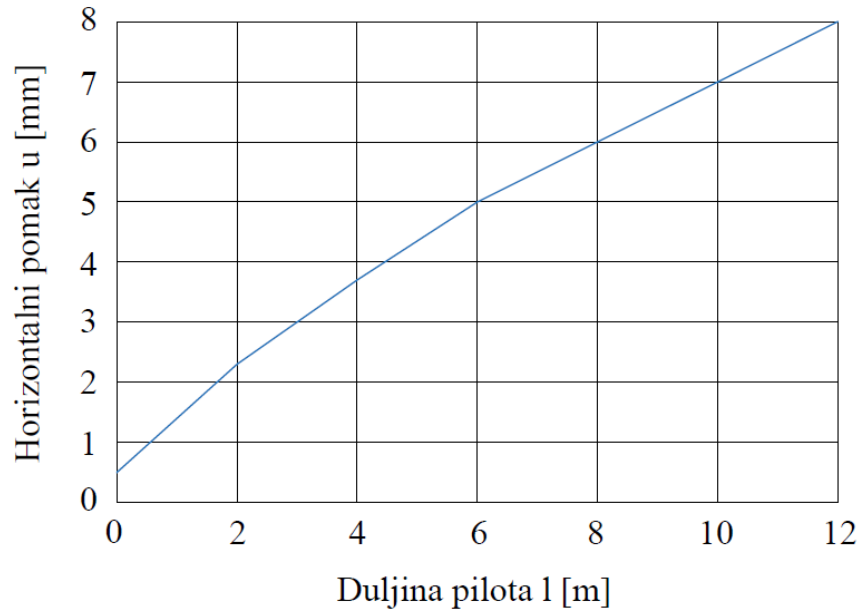
$$\left. \begin{array}{l} \Delta x = u + y \cdot \varphi \\ \Delta y = v + x \cdot \varphi \end{array} \right\} \text{IV. kvadrant}$$

## UVJETNE JEDNADŽBE

Sile na pilote	Sile na plitke temelje
$P_x = \Delta x \cdot K = (u \pm y \cdot \varphi) \cdot K$	$T_x = \Delta x \cdot f \cdot t = (u \pm y \cdot \varphi) \cdot f \cdot t$
$P_y = \Delta y \cdot K = (v \pm x \cdot \varphi) \cdot K$	$T_y = \Delta y \cdot f \cdot t = (v \pm x \cdot \varphi) \cdot f \cdot t$

Jednadžbe ravnoteže	
$\Sigma X = 0$	$\Sigma P_x + \Sigma T_x = 0$
$\Sigma Y = 0$	$\Sigma P_y + \Sigma T_y + S = 0$
$\Sigma M = 0$	$\Sigma P_x \cdot y + \Sigma P_y \cdot x + S \cdot e = 0$

7.1.ODNOS DULJINE PILOTA U GLINI I HORIZONTALNOG POMAKA PRI  
OPTEREĆENJU SILOM  $H = 100 \text{ kN}$



$$K = \frac{H}{u} \left[ \frac{kN}{m} \right]$$

$$K_{14} = \frac{100}{0.0037} = 27027 \doteq 27000 \text{ kN/m}$$

$$K_{19} = \frac{100}{0.006} = 16667 \doteq 16700 \text{ kN/m}$$

$$K_{24} = \frac{100}{0.008} = 12500 \doteq 1250 \text{ kN/m}$$

$$K_{15} = \frac{100}{0.0031} = 322508 \doteq 32300 \text{ kN/m}$$

$$K_{20} = \frac{100}{0.0053} = 18868 \doteq 18900 \text{ kN/m}$$

$$K_{25} = \frac{100}{0.007} = 14286 \doteq 14300 \text{ kN/m}$$

$$K_{16} = \frac{100}{0.0023} = 43478 \doteq 43500 \text{ kN/m}$$

$$K_{21} = \frac{100}{0.0046} = 21739 \doteq 21700 \text{ kN/m}$$

$$K_{26} = \frac{100}{0.006} = 16667 \doteq 16700 \text{ kN/m}$$

$$K_{17} = \frac{100}{0.0021} = 47619 \doteq 47600 \text{ kN/m}$$

$$K_{22} = \frac{100}{0.0041} = 24390 \doteq 24400 \text{ kN/m}$$

$$K_{18} = \frac{100}{0.002} = 50000 \doteq 50000 \text{ kN/m}$$

$$K_{23} = \frac{100}{0.0037} = 27027 \doteq 27000 \text{ kN/m}$$

$$K_{28} = \frac{100}{0.005} = 20000 \doteq 20000 \text{ kN/m}$$

14	4.00 3.7 27000	19	8.00 6.0 16700	24	12.00 8.0 12500
15	3.00 3.1 32300	20	6.00 5.3 18900	25	10.00 7.0 14300
16	2.00 2.3 43500	21	5.50 4.6 21700	26	8.00 6.0 16700
17	1.75 2.1 47600	22	4.50 4.1 24400	27	7.00 5.5 18200
18	1.50 2.0 50000	23	4.00 3.7 27000	28	6.00 5.0 20000
ΣK	200400	108700	81700		

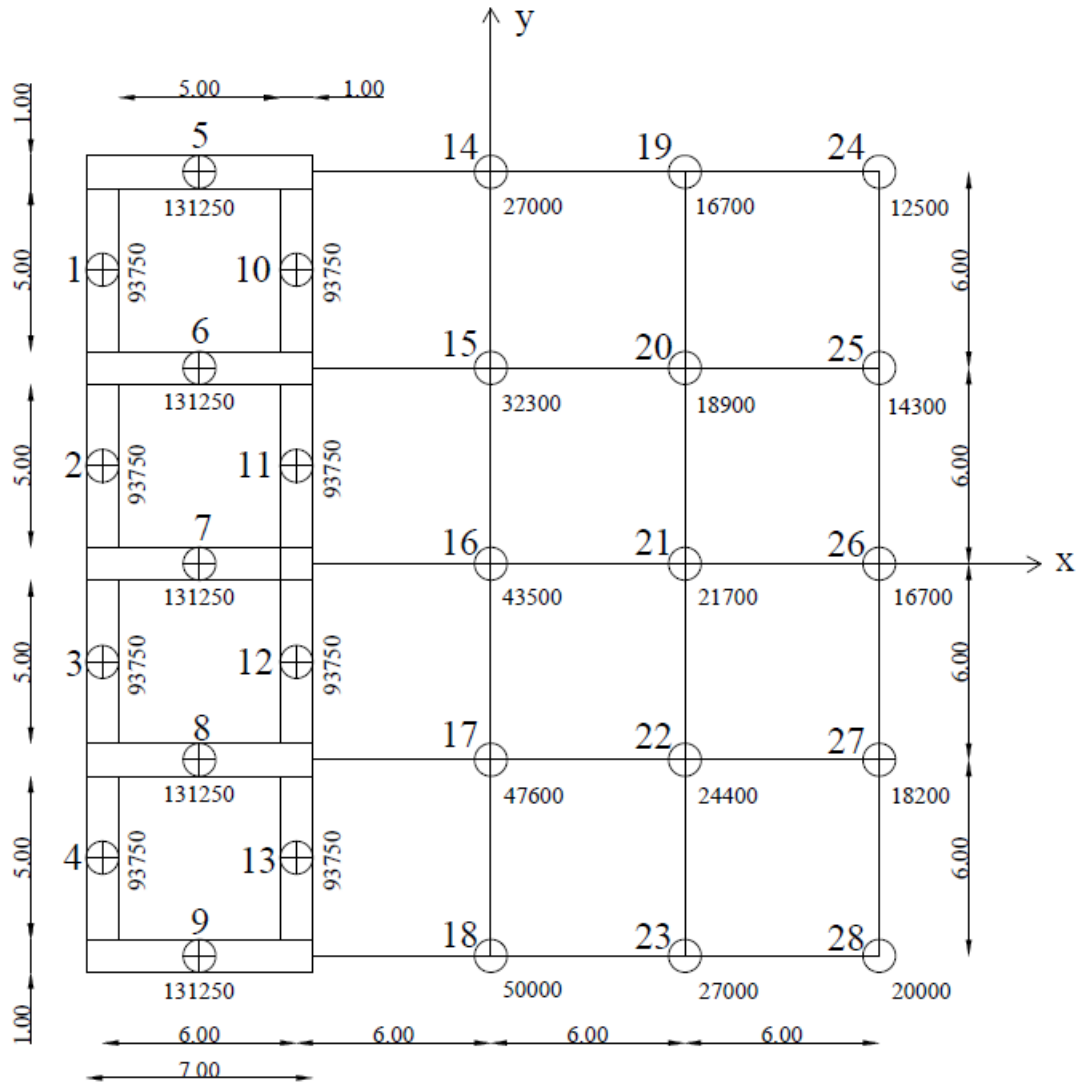
$$t = 18750 \text{ kN/m}^3$$

$$f_5 = f_6 = f_7 = f_8 = f_9 = 1.00 \cdot 7.00 = 7.00 \text{ m}^2$$

$$T_5 = T_6 = T_7 = T_8 = T_9 = 7.00 \cdot 18750 = 131250 \text{ kN/m}$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_{10} = f_{11} = f_{12} = f_{13} = 1.00 \cdot 5.00 = 5.00 \text{ m}^2$$

$$T_1 = T_2 = T_3 = T_4 = T_{10} = T_{11} = T_{12} = T_{13} = 5.00 \cdot 18750 = 93750 \text{ kN/m}$$



## JEDNOSTAVNIJI NAČIN DOBIVANJA JEDNADŽBI RAVNOTEŽE

Zbrojene krutosti ( $K$ ) po stupcima:

$$K_1 = 93750 \cdot 4 = 375000 \text{ kN/m}$$

$$K_2 = 131250 \cdot 5 = 656250 \text{ kN/m}$$

$$K_3 = 93750 \cdot 4 = 375000 \text{ kN/m}$$

$$K_4 = 27000 + 32300 + 43500 + 47600 + 50000 = 200400 \text{ kN/m}$$

$$K_5 = 16700 + 18900 + 21700 + 24400 + 27000 = 108700 \text{ kN/m}$$

$$K_6 = 12500 + 14300 + 16700 + 18200 + 20000 = 81700 \text{ kN/m}$$

Zbrojene krutosti ( $K$ ) po redcima:

$$K_A = 131250 + 27000 + 16700 + 12500 = 187450 \text{ kN/m}$$

$$K_B = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_C = 131250 + 32300 + 18900 + 14300 = 196750 \text{ kN/m}$$

$$K_D = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_E = 131250 + 43500 + 21700 + 16700 = 213150 \text{ kN/m}$$

$$K_F = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_G = 131250 + 47600 + 24400 + 18200 = 221450 \text{ kN/m}$$

$$K_H = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_I = 131250 + 50000 + 27000 + 20000 = 228250 \text{ kN/m}$$

Reaktivne sile u smjeru osi  $y$ :

$$P_y = \Delta y \cdot K = (v \pm x \cdot \varphi) \cdot K$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= (v - 12 \varphi) \cdot 375000 = 375000 v - 4500000 \varphi \\ P_2 &= (v - 9 \varphi) \cdot 656250 = 656250 v - 5906250 \varphi \\ P_3 &= (v - 6 \varphi) \cdot 375000 = 375000 v - 2250000 \varphi \end{aligned} \right\} - 12656250 \varphi$$

$$\begin{array}{rcl}
 P_4 = v \cdot 200400 = & 200400 v & \\
 P_5 = (v + 6 \varphi) \cdot 108700 = 108700 v + 652200 \varphi & & \\
 P_6 = (v + 12 \varphi) \cdot 81700 = 81700 v + 980400 \varphi & & \\
 \hline
 & 1797050 v & + 1632600 \varphi
 \end{array}$$

$$\Sigma Y = 0$$

$$1797050 v + (-12656250 + 1632000) \varphi = 5616$$

$$1797050 v - 11023650 \varphi = 5616 \quad (1)$$

Reaktivne sile u smjeru osi x:

$$P_x = \Delta x \cdot K = (u \pm y \cdot \varphi) \cdot K$$

$$\begin{array}{rcl}
 P_A = (u - 12 \varphi) \cdot 187450 = 187450 u - 2249400 \varphi & & \\
 P_B = (u - 9 \varphi) \cdot 187500 = 187500 u - 1687500 \varphi & & \\
 P_C = (u - 6 \varphi) \cdot 196750 = 196750 u - 1180500 \varphi & & \\
 P_D = (u - 3 \varphi) \cdot 187500 = 187500 u - 562500 \varphi & & \\
 \hline
 P_E = u \cdot 213150 = & 213150 u & \\
 P_F = (u + 3 \varphi) \cdot 187500 = 187500 u + 562500 \varphi & & \\
 P_G = (u + 6 \varphi) \cdot 221450 = 221450 u + 1328700 \varphi & & \\
 P_H = (u + 9 \varphi) \cdot 187500 = 187500 u + 1687500 \varphi & & \\
 P_I = (u + 12 \varphi) \cdot 228250 = 228250 u + 2739000 \varphi & & \\
 \hline
 & 1797050 u & + 6317700 \varphi
 \end{array}$$

$$\Sigma X = 0$$

$$1797050 u + (6317700 - 5679900) \varphi = 0$$

$$1797050 u + 637800 \varphi = 0 \quad (2)$$

TABELARNI ZAPIS JEDNADŽBI MOMENTNE RAVNOTEŽE

S I L A	$(1 - 6): \pm x(v \pm x \varphi)K$ $(A - I): \pm y(u \pm y \varphi)K$	$y \cdot u \cdot K$		$x \cdot v \cdot K$		$x^2 \cdot \varphi \cdot K$ $y^2 \cdot \varphi \cdot K$	
		–	+	–	+	–	+
1	$-12(v - 12 \varphi)375000$			4500000			54000000
2	$-9(v - 9 \varphi) \cdot 656250$			5906250			53156250
3	$-6(v - 6 \varphi)375000$			2250000			13500000
4	$\emptyset(v \cdot 200400)$			/	/		/
5	$6(v + 6 \varphi)108700$				652200		3913200
6	$12(v + 12 \varphi)81700$				980400		11764800
A	$-12(u - 12 \varphi)187450$	2249400					26992800
B	$-9(u - 9 \varphi)187500$	1687500					15187500
C	$-6(u - 6 \varphi)196750$	1180500					7083000
D	$-3(u - 3 \varphi)187500$	562500					1687500
E	$\emptyset \cdot u \cdot 213150$	/	/				/
F	$3(u + 3 \varphi)187500$		562500				1687500
G	$6(u + 6 \varphi)221450$		1328700				7972200
H	$9(u + 9 \varphi)187500$		1687500				15187500
I	$12(u + 12 \varphi)228250$		2739000				32868000
		5679900	6317700	12656250	1632600	245000250	

$$\Sigma M = 0$$

$$(6317700 - 5679900) u + (1632600 - 12656250) v + 245000250 \varphi = 5616 \cdot 1.85$$

$$637800 u - 11023650 v + 245000250 \varphi = 10390 \quad (3)$$

Dobiven je istovjetni sustav jednažbi.

#### RJEŠENJE SUSTAVA JEDNADŽBI

$$1797050 u + 637800 \varphi = 0 \quad (1)$$

$$1797050 v - 11023650 \varphi = 5616 \quad (2)$$

$$637800 u - 11023650 v + 245000250 \varphi = 10390 \quad (3)$$

$$(1) \rightarrow \varphi = -\frac{1797050}{637800} u = -2.817576 u \rightarrow (2), (3) \quad (1')$$

$$31059972 u + 1797050 v = 5616 / : 1000 \quad (2')$$

$$-689669030 u - 11023650 v = 10390 / : 1000 \quad (3')$$

$$31060 u + 1797 v = 5.616 / \cdot 11024 \quad (2'')$$

$$-689669 u - 11024 v = 10.390 / \cdot 1797 \quad (3'')$$

$$342405440 u + 19810128 v = 61911 / +$$

$$-123933500 u - 19810128 v = 18671 / +$$

$$-896929560 u = 80582$$

$$u = \frac{-80582}{896929560} = -0.0898 \cdot 10^{-3} m$$

$$u \rightarrow (1')$$

$$\varphi = -2.817576 \cdot (-0.0898 \cdot 10^{-3}) = 0.253018 \cdot 10^{-3}$$

$$u \rightarrow (2'')$$

$$31060 u + 1797 v = 5.616$$

$$31060 \cdot (-0.0898 \cdot 10^{-3}) + 1797 v = 5.616$$

$$-2892 + 1797 v = 5.616$$



$$1797 \nu = 8.4052$$

$$\nu = \frac{8.4052}{1797} = 4.677 \cdot 10^{-3} m$$

Rješenja su:

$$u = -0.08989 \cdot 10^{-3} m$$

$$\nu = 4.677 \cdot 10^{-3} m$$

$$\varphi = 0.253018 \cdot 10^{-3}$$

### PROVJERA RJEŠENJA

a) Uvrštavanje vrijednosti  $u$ ,  $\nu$  i  $\varphi$  u jednačbe (1), (2) i (3)

$$1797050 u + 637800 \varphi = 0 \quad (1)$$

$$1797.05 \cdot 10^3 \cdot (-0.0898 \cdot 10^{-3}) + 637.80 \cdot 10^3 \cdot 0.2537652 \cdot 10^{-3} = 0$$

$$-161.375 + 161.375 = 0$$

$$0 = 0$$

$$1797050 \nu - 11023650 \varphi = 5616 \quad (2)$$

$$1797.05 \cdot 10^3 \cdot 4.677 \cdot 10^{-3} - 11023.65 \cdot 10^3 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = 5616$$

$$8405 - 2789 = 5616$$

$$5616 = 5616$$

$$637800 u - 11023650 \nu + 245000250 \varphi = 10390 \quad (3)$$

$$637.800 \cdot 10^3 \cdot (-0.0898 \cdot 10^{-3}) - 11023.65 \cdot 10^3 \cdot 4.677 \cdot 10^{-3} + 254000.25 \cdot 10^3 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = 10390$$

$$-57.274 - 51557.661 + 61989.473 = 10390$$

$$-57 - 51600 + 62173 = 10390$$

$$-51675 + 62173 = 10390$$

$$10375 = 10390$$

$$\Delta = \frac{15}{10390} = 1.44 \text{ ‰}$$

Proračun pomaka duž tlocrtnih simetrala objekta

Pomaci duž osi  $x$  u smjeru osi  $y$ :

$$v_I = 4.677 \cdot 10^{-3} - 12.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = (4.677 - 3.0452) \cdot 10^{-3} = 1.640784 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_2 = 4.677 \cdot 10^{-3} - 9.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = (4.677 - 2.2839) \cdot 10^{-3} = 2.399838 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_3 = 4.677 \cdot 10^{-3} - 6.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = (4.677 - 1.5226) \cdot 10^{-3} = 3.158892 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_4 = 4.677 \cdot 10^{-3}$$

$$v_5 = 4.677 \cdot 10^{-3} + 6.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = (4.677 + 1.5226) \cdot 10^{-3} = 6.195108 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_6 = 4.677 \cdot 10^{-3} + 12.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = (4.677 + 3.0452) \cdot 10^{-3} = 7.713216 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Pomaci duž osi  $y$  u smjeru osi  $x$ :

$$u_A = -0.0898 \cdot 10^{-3} - 12.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = -3.126016 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_B = -0.0898 \cdot 10^{-3} - 9.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = -2.366962 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_C = -0.0898 \cdot 10^{-3} - 6.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = -1.607908 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_D = -0.0898 \cdot 10^{-3} - 3.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = -0.848854 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_E = -0.0898 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_F = -0.0898 \cdot 10^{-3} + 3.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = 0.669254 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_G = -0.0898 \cdot 10^{-3} + 6.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = 1.428308 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_H = -0.0898 \cdot 10^{-3} + 9.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = 2.187362 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_I = -0.0898 \cdot 10^{-3} + 12.00 \cdot 0.253018 \cdot 10^{-3} = 2.946416 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ukupne krutosti ležaja po stupcima

$$K_1 = 93750 \cdot 4 = 375000 \text{ kN/m}$$

$$K_2 = 131250 \cdot 5 = 656250 \text{ kN/m}$$

$$K_3 = 93750 \cdot 4 = 375000 \text{ kN/m}$$

$$K_4 = 27000 + 32300 + 43500 + 47600 + 50000 = 200400 \text{ kN/m}$$

$$K_5 = 16700 + 18900 + 21700 + 24400 + 27000 = 108700 \text{ kN/m}$$

$$K_6 = 12500 + 14300 + 16700 + 18200 + 20000 = 81700 \text{ kN/m}$$

Ukupne krutosti ležaja po redcima

$$K_A = 131250 + 27000 + 16700 + 12500 = 187450 \text{ kN/m}$$

$$K_B = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_C = 131250 + 32300 + 18900 + 14300 = 196750 \text{ kN/m}$$

$$K_D = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_E = 131250 + 43500 + 21700 + 16700 = 213150 \text{ kN/m}$$

$$K_F = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_G = 131250 + 47600 + 24400 + 18200 = 221450 \text{ kN/m}$$

$$K_H = 93750 \cdot 2 = 187500 \text{ kN/m}$$

$$K_I = 131250 + 50000 + 27000 + 20000 = 228250 \text{ kN/m}$$

b) Provjera ravnoteže sila;  $P_i = K_i \cdot \Delta_i$

Sile u smjeru y:

$$P_1 = 375000 \cdot 1.640784 \cdot 10^{-3} = 615.29 \text{ kN}$$

$$P_2 = 656250 \cdot 2.399838 \cdot 10^{-3} = 1574.89 \text{ kN}$$

$$P_3 = 375000 \cdot 3.158892 \cdot 10^{-3} = 1184.58 \text{ kN}$$

$$P_4 = 200400 \cdot 4.677 \cdot 10^{-3} = 937.27 \text{ kN}$$

$$P_5 = 108700 \cdot 6.195108 \cdot 10^{-3} = 673.41 \text{ kN}$$

$$P_6 = 81700 \cdot 7.713216 \cdot 10^{-3} = 630.17 \text{ kN}$$

$$\Sigma P_y = 5615.61$$

$$\Delta = 5616 - 5615.61 = 0.39$$

$$\frac{0.39}{5616} = 0.069 \text{ ‰}$$

Sile u smjeru x:

$$P_A = 187450 \cdot 3.126016 \cdot 10^{-3} = 585.97 \text{ kN}$$

$$P_B = 187500 \cdot 2.366962 \cdot 10^{-3} = 443.81 \text{ kN}$$

$$P_C = 196750 \cdot 1.607908 \cdot 10^{-3} = 316.36 \text{ kN}$$

$$P_D = 187500 \cdot 0.848854 \cdot 10^{-3} = 159.16 \text{ kN}$$

$$P_E = 213150 \cdot 0.0898 \cdot 10^{-3} = 19.14 \text{ kN}$$

$$P_F = -187500 \cdot 0.669254 \cdot 10^{-3} = -125.49 \text{ kN}$$

$$P_G = -221450 \cdot 1.428308 \cdot 10^{-3} = -316.30 \text{ kN}$$

$$P_H = -187500 \cdot 2.187362 \cdot 10^{-3} = -410.13 \text{ kN}$$

$$P_I = -228250 \cdot 2.946416 \cdot 10^{-3} = -672.52 \text{ kN}$$

$$\Sigma P_x = 1524.44 - 1524.44$$

$$1524.44 = 1524.44$$

Ravnoteža sile u horizontalnom smjeru je zadovoljena.

## ZAKLJUČAK

Postavljene jednadžbe ravnoteže su dobre, a rješenja sustava jednadžbi ravnoteže (1), (2) i (3) su točna.

## PRORAČUN SILA NA NEKE PILOTE

Pilot na mjestu najvećeg pomaka (ležaj br. 24):

$$\Delta x = 3.0452 \text{ mm}$$

$$\Delta y = 7.713216 \text{ mm}$$

$$\Delta = \sqrt{3.0452^2 + 7.713216^2} = 8.30 \text{ mm}$$

$$K = 12500 \text{ kN/m}$$

$$P = 12.50 \cdot 10^3 \cdot 8.30 \cdot 10^{-3} = 104 \text{ kN}$$

Pilot najveće krutosti (ležaj br. 13):

$$\Delta x = 2.946416 \text{ mm}$$

$$\Delta y = 4.677 \text{ mm}$$

$$\Delta = \sqrt{2.946416^2 + 4.677^2} = 5.53 \text{ mm}$$

$$K = 50000 \text{ kN/m}$$

$$P = 50.00 \cdot 10^3 \cdot 5.53 \cdot 10^{-3} = 277 \text{ kN}$$

Najveći pomak temeljnog roštilja:

$$\Delta x = 3.126016 \text{ mm}$$

$$\Delta y = 1.64078 \text{ mm}$$

$$\Delta = \sqrt{3.126016^2 + 1.64078^2} = 3.53 \text{ mm}$$

Kod pomaka 3.53 mm još vrijedi linearni odnos između pomaka i posmičnog naprezanja pa su i posmične krutosti  $T$  ležaja 1-13 točne.

## 7.2. TEMELJNI ROŠTILJ LEŽI IZRAVNO NA LAPORU

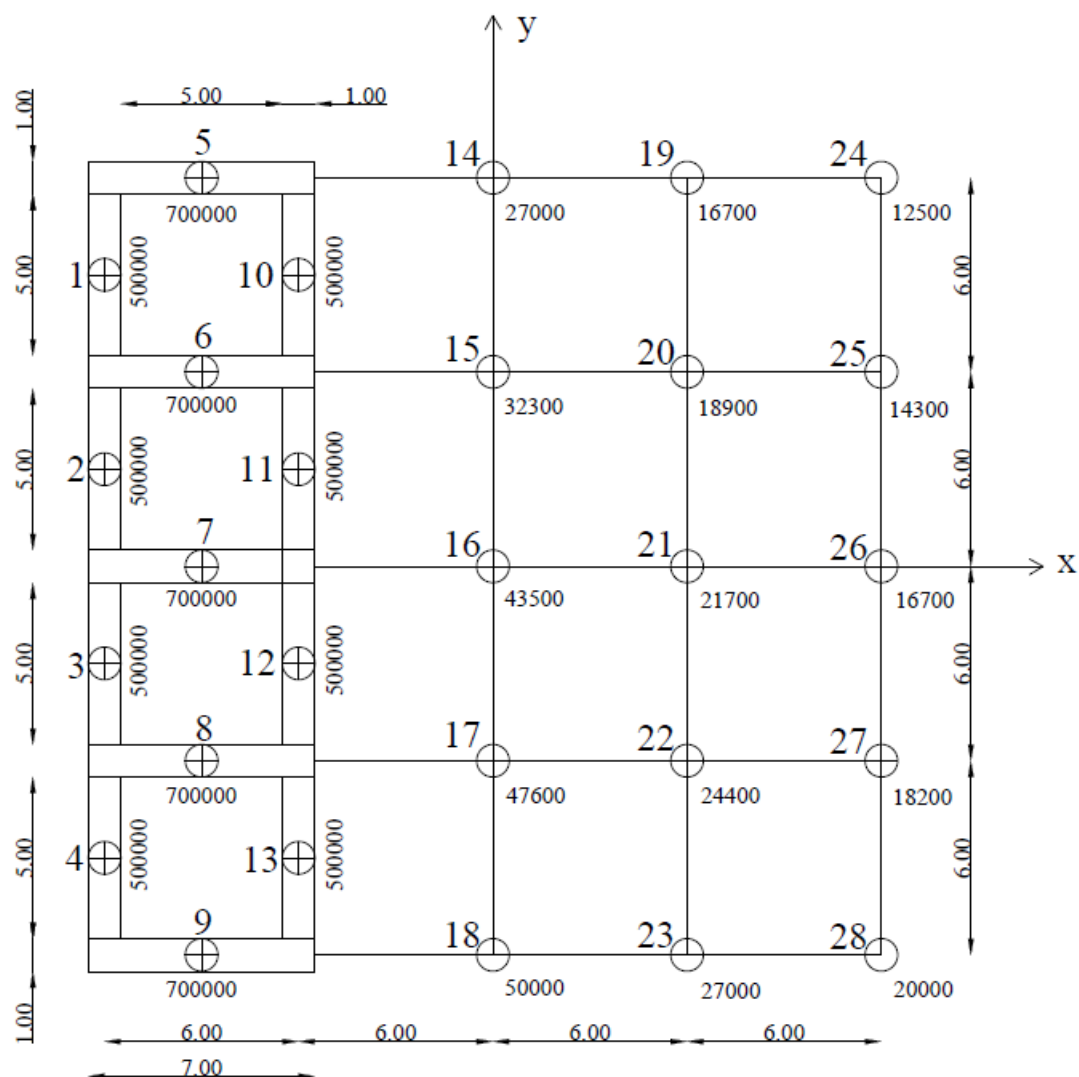
$$t = 100000 \text{ kN/m}^3$$

$$f_1 = f_2 = f_3 = f_4 = f_{10} = f_{11} = f_{12} = f_{13} = 1.00 \cdot 5.00 = 5.00 \text{ m}^2$$

$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K_{10} = K_{11} = K_{12} = K_{13} = 5.00 \cdot 100\,000 = 500000 \text{ kN/m}$$

$$f_5 = f_6 = f_7 = f_8 = f_9 = 1.00 \cdot 7.00 = 7.00 \text{ m}^2$$

$$K_5 = K_6 = K_7 = K_8 = K_9 = 7.00 \cdot 100000 = 700000 \text{ kN/m}$$



Zbrojene krutosti (K) po stupcima:

$$K_1 = 500000 \cdot 4 = 2000000 \text{ kN/m}$$

$$K_2 = 700000 \cdot 5 = 3500000 \text{ kN/m}$$

$$K_3 = 500000 \cdot 4 = 2000000 \text{ kN/m}$$

$$K_4 = 27000 + 32300 + 43500 + 47600 + 50000 = 200400 \text{ kN/m}$$

$$K_5 = 16700 + 18900 + 21700 + 24400 + 27000 = 108700 \text{ kN/m}$$

$$K_6 = 12500 + 14300 + 16700 + 18200 + 20000 = 81700 \text{ kN/m}$$

Zbrojene krutosti (K) po redcima:

$$K_A = 700000 + 27000 + 16700 + 12500 = 756200 \text{ kN/m}$$

$$K_B = 500000 \cdot 2 = 1000000 \text{ kN/m}$$

$$K_C = 700000 + 32300 + 18900 + 14300 = 765500 \text{ kN/m}$$

$$K_D = 500000 \cdot 2 = 1000000 \text{ kN/m}$$

$$K_E = 700000 + 43500 + 21700 + 16700 = 781900 \text{ kN/m}$$

$$K_F = 500000 \cdot 2 = 1000000 \text{ kN/m}$$

$$K_G = 700000 + 47600 + 24400 + 18200 = 790200 \text{ kN/m}$$

$$K_H = 500000 \cdot 2 = 1000000 \text{ kN/m}$$

$$K_I = 700000 + 50000 + 27000 + 20000 = 797000 \text{ kN/m}$$

Horizontalne sile otpora u smjeru osi y:

$$P_1 = (v - 12 \varphi) \cdot 2000000 = 2000000 v - 24000000 \varphi$$

$$P_2 = (v - 9 \varphi) \cdot 3500000 = 3500000 v - 31500000 \varphi$$

$$P_3 = (v - 6 \varphi) \cdot 2000000 = 2000000 v - 12000000 \varphi$$

$$P_4 = (v - 0 \varphi) \cdot 200400 = 200400 v$$

$$P_5 = (v + 6 \varphi) \cdot 108700 = 108700 v + 652200 \varphi$$

$$P_6 = (v + 12 \varphi) \cdot 81700 = 81700 v + 980400 \varphi$$

---


$$7890800 v - 65867400 \varphi$$

Jednadžba ravnoteže sile u smjeru osi y:

$$7890800 v - 65867400 \varphi = 5616 \quad (1)$$

Horizontalne sile otpora u smjeru osi x:

$$\begin{array}{lcl}
 P_A = (u - 12 \varphi) \cdot 756200 = 756200 u - 9074400 \varphi & & \\
 P_B = (u - 9 \varphi) \cdot 1000000 = 1000000 u - 9000000 \varphi & \left. \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right\} & - 25667400 \\
 P_C = (u - 6 \varphi) \cdot 765500 = 765500 u - 4593000 \varphi & & \\
 P_D = (u - 3 \varphi) \cdot 1000000 = 1000000 u - 3000000 \varphi & & \\
 P_E = (u - 0 \varphi) \cdot 781900 = 781900 u & & \\
 P_F = (u + 3 \varphi) \cdot 1000000 = 1000000 u + 3000000 \varphi & \left. \begin{array}{c} \\ \\ \\ \end{array} \right\} & + 26305200 \\
 P_G = (u + 6 \varphi) \cdot 790200 = 790200 u + 4741200 \varphi & & \\
 P_H = (u + 9 \varphi) \cdot 1000000 = 1000000 u + 9000000 \varphi & & \\
 P_I = (u + 12 \varphi) \cdot 797000 = 797000 u + 9564000 \varphi & & \\
 \hline
 & & 7890800 u + 637800 \varphi
 \end{array}$$

Jednadžba ravnoteže sile u smjeru osi x:

Nema aktivnih sila pa su reaktivne sile u međusobnoj ravnoteži.

$$7890800 u + 637800 \varphi = 0 \quad (2)$$

Jednadžba ravnoteže statičkih momenata aktivne sile ( $S = 5616$ ,  $e = 1.85$ ) i reaktivnih sila otpora:

$$\sum_{i=1}^6 P_i \cdot x_i + \sum_{i=A}^I P_i \cdot y_i = 5616 \cdot 1.85$$



TABELARNI ZAPIS JEDNADŽBI MOMENTNE RAVNOTEŽE

S I L A	$(1 - 6): \pm x(v \pm x \varphi)K$ $(A - I): \pm y(u \pm y \varphi)K$	$y \cdot u \cdot K$		$x \cdot v \cdot K$		$x^2 \cdot \varphi \cdot K$ $y^2 \cdot \varphi \cdot K$	
		–	+	–	+	–	+
1	$-12(v - 12 \varphi)200000$			24000000			288000000
2	$-9(v - 9 \varphi)3500000$			31500000			283500000
3	$-6(v - 6 \varphi)2000000$			12000000			72000000
4	$\emptyset(v \cdot 200400)$			/	/		/
5	$6(v + 6 \varphi)108700$				652200		3913200
6	$12(v + 12 \varphi)81700$				980400		11764800
A	$-12(u - 12 \varphi)756200$	9047400					108892800
B	$-9(u - 9 \varphi)1000000$	9000000					81000000
C	$-6(u - 6 \varphi)765500$	4593000					27558000
D	$-3(u - 3 \varphi)1000000$	3000000					9000000
E	$\emptyset(u \cdot 781900)$	/	/				/
F	$3(u + 3 \varphi)1000000$		3000000				9000000
G	$6(u + 6 \varphi)790200$		4741200				28447200
H	$9(u + 9 \varphi)1000000$		9000000				81000000
I	$12(u + 12 \varphi)797000$		9564000				114768000
		25667400	26305200	67500000	1632600	1118844000	

$$\Sigma M = 0$$

$$(26305200 - 25667400) u + (1632600 - 67500000) v + 1118844000 \varphi = 5616 \cdot 1.85$$

$$637800 u - 65867400 v + 1118844000 \varphi = 10390 \quad (3)$$

## RJEŠENJE SUSTAVA JEDNADŽBI

$$7890800 \nu - 65867400 \varphi = 5616 / 1000$$

$$7890800 u + 637800 \varphi = 0 / 1000$$

$$637800 u - 65867400 \nu + 1118844000 \varphi = 10390 / 1000$$

$$7890.8 \nu - 65867.4 \varphi = 5.616 \quad (1)$$

$$7890.8 u + 637.8 \varphi = 0 \quad (2)$$

$$637.8 u - 65867.4 \nu + 1118844.0 \varphi = 10.390 \quad (3)$$

$$(2) \rightarrow \varphi = -\frac{7890.8}{637.8} u = -12.371903 u \rightarrow (1), (3) \quad (1')$$

$$814905.1 u + 7890.8 \nu = 5.616 \quad (2')$$

$$-13841592 u - 65867.4 \nu = 10.390 \quad (3')$$

$$814905.1 u + 7890.8 \nu = 5.616 / \cdot 65867 \quad (2'')$$

$$-13841592 u - 65867.4 \nu = 10.390 / \cdot 7891 \quad (3'')$$

$$5.36753 \cdot 10^{10} u + 5.19756 \cdot 10^8 \nu = 369909 / +$$

$$-10.92240 \cdot 10^{10} u - 5.19756 \cdot 10^8 \nu = 81987 / +$$

$$-5.55487 \cdot 10^{10} u = 451896$$

$$u = -\frac{451896}{5.55487 \cdot 10^{10}} = -0.81351 \cdot 10^{-5} m$$

$$u \rightarrow (1')$$

$$\varphi = -12.371903 \cdot (-0.81351 \cdot 10^{-5}) = 1.00647 \cdot 10^{-4}$$

$$u \rightarrow (2'')$$

$$814905 u + 7891 \nu = 5.616$$

$$7891 \nu = 5.616 - 814905 \cdot (-0.81351 \cdot 10^{-5}) = 5.616 + 6.629$$

$$7891 \nu = 12.245$$

$$v = \frac{12.245}{7891} = 1.5518 \cdot 10^{-3} m$$

Rješenja su:

$$u = -0.81351 \cdot 10^{-5} m$$

$$v = 1.5518 \cdot 10^{-3} m$$

$$\varphi = 1.00647 \cdot 10^{-4}$$

#### PROVJERA RJEŠENJA JEDNADŽBI

(1)

$$7890.8 \cdot 1.5518 \cdot 10^{-3} - 65867.4 \cdot 10^{-4} = 5.616$$

$$12.245 - 6.629 = 5.616$$

$$5.616 = 5.616$$

(2)

$$7890.8 \cdot (-0.81351 \cdot 10^{-5}) + 637.8 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 0$$

$$-641.92 \cdot 10^{-4} + 641.93 \cdot 10^{-4} = 0$$

$$0.01 = 0$$

(3)

$$637.8 \cdot (-0.81351 \cdot 10^{-5}) - 65867.4 \cdot 1.5518 \cdot 10^{-3} + 1118844 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 10.390$$

$$-518.86 \cdot 10^{-5} - 102213.03 \cdot 10^{-3} + 1126082.9 \cdot 10^{-4} = 10.390$$

$$-5.1886 \cdot 10^{-3} - 102213.03 \cdot 10^{-3} + 112608.29 \cdot 10^{-3} = 10.390$$

$$10.390 = 10.390$$

Rješenja sustava jednačbi su dobra.

Provjera ravnoteže:

Pomaci u smjeru osi y:

$$v_1 = 1.5518 \cdot 10^{-3} - 12.00 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 0.3440 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_2 = 1.5518 \cdot 10^{-3} - 9.00 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 0.6460 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_3 = 1.5518 \cdot 10^{-3} - 6.00 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 0.9479 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_4 = 1.5518 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_5 = 1.5518 \cdot 10^{-3} + 6.00 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 2.1557 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$v_6 = 1.5518 \cdot 10^{-3} + 12.00 \cdot 1.00647 \cdot 10^{-4} = 2.7596 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Pomaci u smjeru osi x:

$$u_A = -0.00814 \cdot 10^{-3} - 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 12.00 = -1.2159 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_B = -0.00814 \cdot 10^{-3} - 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 9.00 = -0.91396 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_C = -0.00814 \cdot 10^{-3} - 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 6.00 = -0.61202 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_D = -0.00814 \cdot 10^{-3} - 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 3.00 = -0.31008 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_E = -0.00814 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_F = -0.00814 \cdot 10^{-3} + 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 3.00 = 0.29380 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_G = -0.00814 \cdot 10^{-3} + 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 6.00 = 0.59574 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_H = -0.00814 \cdot 10^{-3} + 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 9.00 = 0.89768 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$u_I = -0.00814 \cdot 10^{-3} + 1.00647 \cdot 10^{-4} \cdot 12.00 = 1.19962 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Reaktivne sile u smjeru osi y:

$$P_1 = 0.3440 \cdot 10^{-3} \cdot 2000000 = 688 \text{ kN}$$

$$P_2 = 0.6460 \cdot 10^{-3} \cdot 3500000 = 2261 \text{ kN}$$

$$P_3 = 0.9479 \cdot 10^{-3} \cdot 2000000 = 1896 \text{ kN}$$

$$P_4 = 1.5518 \cdot 10^{-3} \cdot 200400 = 311 \text{ kN}$$

$$P_5 = 2.1557 \cdot 10^{-3} \cdot 108700 = 234 \text{ kN}$$

$$P_6 = 2.7596 \cdot 10^{-3} \cdot 81700 = 225 \text{ kN}$$

---

$$5615 \doteq S = 5616 \text{ kN}$$

Reaktivne sile u smjeru osi x:

$$P_A = 1.2159 \cdot 10^{-3} \cdot 756200 = 919.46 \text{ kN}$$

$$P_B = 0.91396 \cdot 10^{-3} \cdot 1000000 = 913.96 \text{ kN}$$

$$P_C = 0.61202 \cdot 10^{-3} \cdot 765500 = 468.50 \text{ kN}$$

$$P_D = 0.31008 \cdot 10^{-3} \cdot 1000000 = 310.08 \text{ kN}$$

$$P_E = 0.00814 \cdot 10^{-3} \cdot 781900 = 6.36 \text{ kN}$$

$$P_F = 0.29380 \cdot 10^{-3} \cdot (-1000000) = -293.80 \text{ kN}$$

$$P_G = 0.59574 \cdot 10^{-3} \cdot (-790200) = -470.75 \text{ kN}$$

$$P_H = 0.89768 \cdot 10^{-3} \cdot (-1000000) = -897.68 \text{ kN}$$

$$P_I = 1.19962 \cdot 10^{-3} \cdot (-756200) = -956.10 \text{ kN}$$

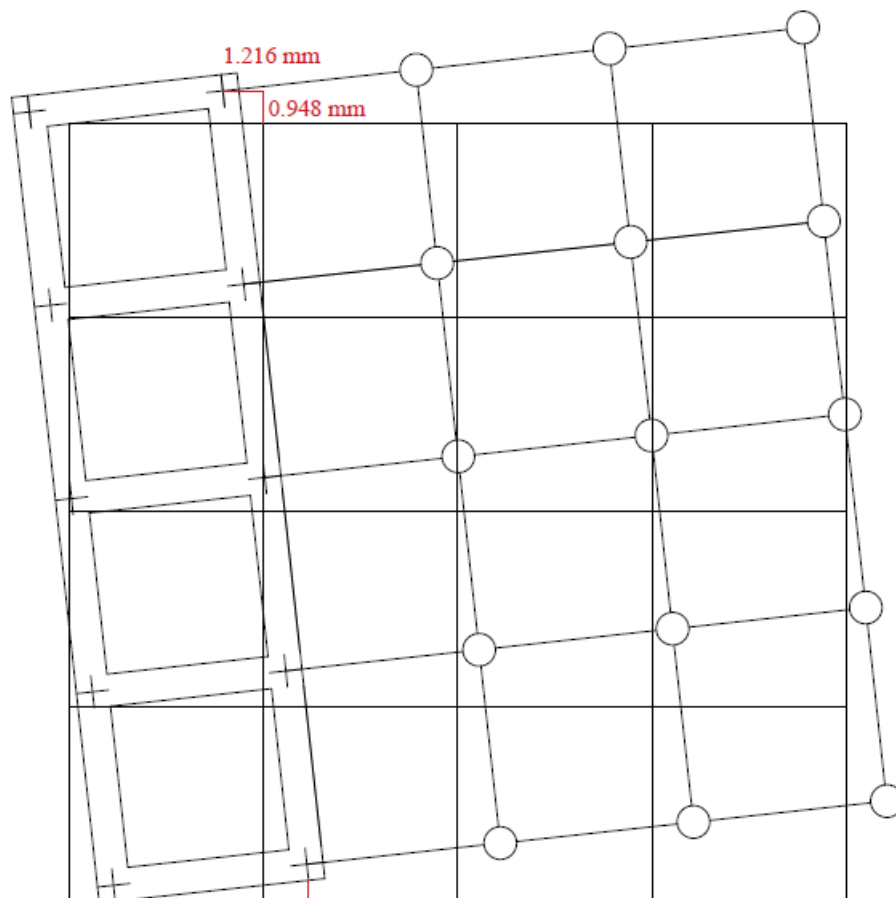
---

$$\Sigma P_x = 2618.36 - 2618.33$$

$$2616.36 = 2618.33$$

$$\Delta = 0.03 \text{ kN} \doteq \emptyset$$

## POMACI TEMELJNOG I NAGLAVNOG ROŠTILJA



$$\Delta_{max} = \sqrt{u_A^2 + v_3^2}$$

$$\Delta_{max} = \sqrt{1.216^2 + 0.948^2} = 1.542 \text{ mm}$$

Najveći pomak je u granicama linearnog odnosa pomaka i posmičnog naprezanja.

## 8. ZAKLJUČAK

U pravilu, plitko je temeljenje ekonomičnije od dubokog temeljenja te ga treba primjenjivati uvijek i tamo gdje se odgovarajućim mjerama i postupcima može postići potrebna stabilnost objekta u pogledu nosivosti i slijeganja tla ispod objekta. Kada tlo u dostupnoj dubini nema dovoljnu moć nošenja ili je pak njegova stišljivost prevelika, pa bi slijeganje bilo neprihvatljivo veliko, građevina se mora osloniti na dublje slojeve tla koji imaju veću nosivost ili manju stišljivost. U takvim slučajevima riječ je o dubokom temeljenju građevine, među koje spada i temeljenje na pilotima.

Pilot kao konstruktivni element može biti opterećen kosom silom i momentom. Rastavljanjem sile na komponentu u smjeru osi pilota i okomito na os, analiza se može svesti na odvojene probleme uzdužno i poprečno opterećenog pilota. Kod uzdužno opterećenih pilota u većini je slučajeva tlo kritični element, jer uzdužne sile koje djeluju na pilot nisu dovoljno velike da značajnije deformiraju pilot, prije nego li dođe do loma tla. S druge strane, kod poprečno opterećenih pilota, opterećenja na pilot su dovoljno velika da se mora izvršiti analiza naprezanja i deformacija u pilotu, jer pilot postaje kritičan element u sistemu konstrukcija - tlo.

Ako je pilot veoma krut u odnosu na tlo, kritična dužina pilota poprima relativno veliku vrijednost, što će imati za posljedicu da će opterećenje na pilot uzrokovati pomake pilota na značajnijoj udaljenosti od mjesta djelovanja opterećenja. S druge strane mekani pilot i kruto tlo dat će relativno malu kritičnu dužinu.

Pri analizi poprečno opterećenih pilota, ključnu ulogu pri dimenzioniranju imaju maksimalni moment savijanja u pilotu te maksimalni (horizontalni) pomak vrha pilota.

Odabir proračuna poprečno opterećenih pilota ovisi o složenosti modela, tj. o tome u kojoj mjeri se računskim modelom želimo približiti stvarnom ponašanju tla. Način proračuna se općenito može podijeliti na analitički i numerički.

Ponekad se dogodi da nije dovoljna samo jedna metoda temeljenja već je potrebno koristiti i plitko i duboko temeljenje tj. kombinirano.

Spomenuti način temeljenja je relativno čest u priobalnom području, gdje objekt (zgradu) treba graditi na mjestu neujednačenog sastava tla, odnosno kada dio objekta leži na čvrstom, a dio na mekom tlu ili nasipu. U takvom slučaju dio zgrade na slabom tlu, očito treba duboko temeljiti na pilotima različite duljine (dubine), a ponekad i različitog promjera, dok se dio zgrade može

temeljiti plitko na temeljnom roštilju. Konkretno u ovom radu, tj. u praktičnom dijelu rada, na tlocrtnim dijelovima objekta, gdje je tlo slabijih svojstava izvedeno je duboko temeljenje na pilotima različite duljine (dubine), ali istog promjera ( $1\text{ m}$ ). Na dijelovima tlocrta gdje se pojavljuje lapor na kontaktu s temeljnom stopom, izveden je temeljni roštilji.

Prijenos vertikalnog opterećenja nije razmatran u radu. Generalno, odabran je broj, dubina i promjer pilota, koji zadovoljavaju dokaze na granična stanja sloma tla i uporabivosti objekta. Analiza je provedena kako bi se kvantificirao prijenos horizontalnih sila (horizontalno ubrzanje mase zgrade izazvano potresom). Zgrada je nesimetrična, pa je hvatište resultantne sile odmaknuto od hvatišta sila otpora temelja, koje ovisi o vrsti temelja i svojstvima tla. Pri tome će se objekt, prilikom djelovanja seizmičkih sila, pomaknuti, što će uzrokovati aktiviranje unutarnjih sila u pilotima i na kontaktu temeljnog roštilja i tla.

U prvom dijelu proračuna je prikazan odnos duljine pilota u glini i horizontalnog pomaka pri opterećenju silom  $H = 100\text{ kN}$ , način dobivanja jednadžbi ravnoteže, pomaci u osima objekta, reaktivne sile te ukupne krutosti ležaja po stupcima i redcima. U drugom dijelu proračuna gdje temeljni roštilj leži izravno na laporu je također prikazan način dobivanja jednadžbi ravnoteže, pomaci u osima objekta, reaktivne sile te ukupne krutosti ležaja po stupcima i redcima.

Prikazani, kombinirani način, rješenja temeljenja na tlu neujednačenih svojstava se koristi u inženjerskim zadaćama, kada je neracionalno tražiti rješenje primjenom samo jednog od sustava temeljenja (plitko ili duboko). U konkretnom slučaju značajne dubine nasipa, uz istovremeno pojavljivanje čvrste stijene na površini terena, odabir jedinstvenog načina temeljenja uzrokovao bi dvije međusobno različite, ali istovremeno tehnički i ekonomski neprihvatljive posljedice. Ako je temeljenje plitko, bilo bi potrebno provesti ojačanje tla na dijelu površine objekta sve do čvrste podloge. Ako je odabrana varijanta dubokog temeljenja, tada bi se izvodili piloti na dijelu tlocrta, gdje to nije potrebno.

Prikazana je relativno jednostavna, analitička metoda određivanja horizontalnih pomaka konstrukcije na djelovanje seizmičkih sila, odnosno dobivanje potrebnih vrijednosti unutarnjih sila na sastavnice temeljnog sklopa te provedbu odgovarajućih dokaza nosivosti.



## 9. LITERATURA

1. Roje – Bonacci, T. (2010): Duboko temeljenje i poboljšanje temeljnog tla, Građevinsko – arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu; Split
2. Roje – Bonacci, T. (2003): Mehanika tla, Građevinski fakultet Sveučilišta u Splitu; Split
3. Percel, B. (1982): Osnovno temeljenje, 1, Osnovne metode izvođenja plitkih i dubokih temelja; Rudarsko – geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu; Zagreb
4. Ivandić, K. (šk. god. 2010/2011): Temeljenje I, Poprečno opterećeni piloti
5. Ivandić, K. (šk. god. 2010/2011): Temeljenje I, Horizontalna sila
6. URL 1: [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Temeljenje - Plitko.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Temeljenje_-_Plitko.pdf) (20. 05. 2017.)
7. URL 2: <https://www.scribd.com/doc/116020104/07-Plitki-temelji> (20. 05. 2017.)
8. URL 3: [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Temeljenje - Uvod.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/Temeljenje_-_Uvod.pdf) (20. 05. 2017.)

## POPIS SLIKA

Slika 1.: Osnovni pojmovi kod temelja.....	1
Slika 2.: Postupak projektiranja temeljenja.....	2
Slika 3.: Jedna od klasifikacija temelja.....	3
Slika 4.: Plitko temeljenje.....	4
Slika 5.: Vrste plitkih temelja: a) temelj samac, b) temeljna greda, c) temeljna traka, d) temeljna ploča.....	5
Slika 6.: Duboko temeljenje.....	7
Slika 7.: Duboki masivni temelji izvedeni iskopom (primjer bunara i kesona).....	8
Slika 8.: Duboki masivni temelj od poboljšanog tla (raznih tehnologija izvedbe).....	9
Slika 9.: Duboki, raščlanjeni temelji-piloti (primjer).....	9
Slika 10.: Tlocrtni oblici dubokih temelja izvedenih od panela tehnologijom dijafragmi i/ili mixed in place (MIP) tehnologijom.....	10
Slika 11.: Uvjeti korištenja pilota i osnovne oznake.....	14
Slika 12.: Odnosi pilota i tla, prikladni i neprikladni za primjenu pilota.....	15
Slika 13.: Kruti i fleksibilni pilot opterećen horizontalnom silom $H$ .....	13
Slika 14.: Prikaz načina modeliranja tla.....	22
Slika 15.: Horizontalno opterećen vertikalni pilot.....	22
Slika 16.: Funkcije naprezanja pilota i tla.....	27
Slika 17.: Plan pomaka apsolutno krute naglavne konstrukcije.....	30
Slika 18.: Rezultati laboratorijskih pokusa te interpolaciona funkcija.....	31

## POPIS TABLICA

Tablica 1.: Tipične građevine i njeni temelji.....	11
Tablica 2.: Odabir načina temeljenja prema zahtjevima građevine i svojstvima tla.....	12